

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

IN RE APPLICATION OF: Eiichi ONO

GAU:

SERIAL NO: New Application

EXAMINER:

FILED: Herewith

FOR: VEHICLE CONTROL METHOD AND VEHICLE CONTROL APPARATUS

REQUEST FOR PRIORITY

COMMISSIONER FOR PATENTS  
ALEXANDRIA, VIRGINIA 22313

SIR:

☐ Full benefit of the filing date of U.S. Application Serial Number , filed , is claimed pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §120.

☐ Full benefit of the filing date(s) of U.S. Provisional Application(s) is claimed pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §119(e): Application No. Date Filed

☒ Applicants claim any right to priority from any earlier filed applications to which they may be entitled pursuant to the provisions of 35 U.S.C. §119, as noted below.

In the matter of the above-identified application for patent, notice is hereby given that the applicants claim as priority:

<u>COUNTRY</u>	<u>APPLICATION NUMBER</u>	<u>MONTH/DAY/YEAR</u>
Japan	2003-024177	January 31, 2003
Japan	2003-385973	November 14, 2003

Certified copies of the corresponding Convention Application(s)

☒ are submitted herewith

☐ will be submitted prior to payment of the Final Fee

☐ were filed in prior application Serial No. filed

☐ were submitted to the International Bureau in PCT Application Number

Receipt of the certified copies by the International Bureau in a timely manner under PCT Rule 17.1(a) has been acknowledged as evidenced by the attached PCT/IB/304.

☐ (A) Application Serial No.(s) were filed in prior application Serial No. filed ; and

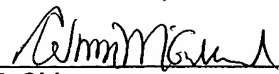
☐ (B) Application Serial No.(s)

☐ are submitted herewith

☐ will be submitted prior to payment of the Final Fee

Respectfully Submitted,

OBLON, SPIVAK, McCLELLAND,  
MAIER & NEUSTADT, P.C.

  
\_\_\_\_\_  
Norman F. Oblon

Registration No. 24,618

C. Irvin McClelland  
Registration Number 21,124

Customer Number

22850

Tel. (703) 413-3000  
Fax. (703) 413-2220  
(OSMMN 05/03)

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日            2 0 0 3 年   1 月 3 1 日  
Date of Application:

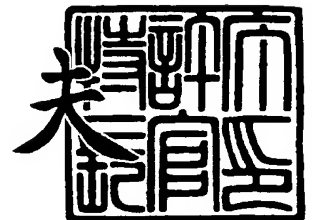
出 願 番 号            特 願 2 0 0 3 - 0 2 4 1 7 7  
Application Number:  
[ST. 10/C]:            [ J P 2 0 0 3 - 0 2 4 1 7 7 ]

出      願      人            株式会社豊田中央研究所  
Applicant(s):

2 0 0 3 年 1 1 月 1 4 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今 井 康 夫



出証番号    出証特 2 0 0 3 - 3 0 9 4 4 9 1

【書類名】 特許願

【整理番号】 TCP-00195

【提出日】 平成15年 1月31日

【あて先】 特許庁長官殿

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道 4 1 番地の 1 株  
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 小野 英一

【特許出願人】

【識別番号】 000003609

【氏名又は名称】 株式会社豊田中央研究所

【代理人】

【識別番号】 100079049

【弁理士】

【氏名又は名称】 中島 淳

【電話番号】 03-3357-5171

【選任した代理人】

【識別番号】 100084995

【弁理士】

【氏名又は名称】 加藤 和詳

【電話番号】 03-3357-5171

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 006839

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9102478

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 車両制御方法及び車両制御装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ドライバが望む車体運動を得るために車体に加えるべき目標合成力と各車輪の限界摩擦円の大きさに基づいて、各車輪の  $\mu$  利用率を最適化するタイヤ発生力の大きさ及び方向を各車輪毎に求め、

求めたタイヤ発生力の大きさ及び方向に基づいて、各車輪の操舵角と制動力及び駆動力の少なくとも一方とを制御する車両制御方法。

【請求項 2】 前記限界摩擦円の大きさを各輪の  $\mu$  推定値または仮想  $\mu$  値及び各輪荷重に基づいて求める請求項 1 記載の車両制御方法。

【請求項 3】 各車輪の前記タイヤ発生力の大きさを、前記目標合成力と前記各車輪の限界摩擦円の大きさを得られる限界合成力との比で表される  $\mu$  利用率と、各車輪の前記限界摩擦円の大きさを乗算して求める請求項 1 または 2 記載の車両制御方法。

【請求項 4】 前記各車輪の前記タイヤ発生力の方向を、前記目標合成力と前記限界摩擦円の大きさをパラメータとして含む車輪数より少ない線形化された代数方程式に基づいて求める請求項 1～請求項 3 のいずれか 1 項記載の車両制御方法。

【請求項 5】 前記各車輪の  $\mu$  利用率を最適化するタイヤ発生力の大きさ及び方向は、各車輪の  $\mu$  利用率を均等に最小化するタイヤ発生力の大きさ及び方向である請求項 1～4 のいずれか 1 項記載の車両制御方法。

【請求項 6】 前記各車輪の  $\mu$  利用率を最適化するタイヤ発生力の大きさ及び方向は、前後輪の  $\mu$  利用率が異なるようにするタイヤ発生力の大きさ及び方向である請求項 1～4 のいずれか 1 項記載の車両制御方法。

【請求項 7】 前記各車輪の  $\mu$  利用率を最適化するタイヤ発生力の大きさ及び方向は、各車輪のタイヤ発生力の大きさが輪荷重に比例するようにするタイヤ発生力の大きさ及び方向である請求項 1～4 のいずれか 1 項記載の車両制御方法。

【請求項 8】 各車輪の路面  $\mu$  が異なるために輪荷重に比例するタイヤ発生力の大きさが得られない場合には、低  $\mu$  輪については限界摩擦円の大きさをタイヤ発生力の大きさとして用い、高  $\mu$  輪については  $\mu$  利用率を最小とするタイヤ発生力の大きさを用いる請求項 7 記載の車両制御方法。

【請求項 9】 左右の車輪で操舵角が同一になるように制御する請求項 1 ～ 8 のいずれか 1 項記載の車両制御方法。

【請求項 10】 ドライバが望む車体運動を得るために車体に加えるべき目標合成力を演算する目標合成力演算手段と、

各車輪の限界摩擦円の大きさを推定する限界摩擦円推定手段と、

前記目標合成力と前記各車輪の限界摩擦円の大きさに基づいて、各車輪の  $\mu$  利用率を最適化するタイヤ発生力の大きさ及び方向を各車輪毎に演算するタイヤ発生力演算手段と、

演算されたタイヤ発生力の大きさ及び方向に基づいて、各車輪の操舵角と制動力及び駆動力の少なくとも一方とを制御する制御手段と、

を含む車両制御装置。

【請求項 11】 ドライバが望む車体運動を得るために車体に加えるべき目標合成力を演算する演算手段と、

各車輪の限界摩擦円の大きさを推定する限界摩擦円推定手段と、

前記限界摩擦円推定手段で推定された各車輪の限界摩擦円の大きさに基づいて、限界合成力を推定する限界合成力推定手段と、

前記目標合成力と前記限界合成力との比を  $\mu$  利用率として設定する  $\mu$  利用率設定手段と、

各車輪の前記限界摩擦円の大きさに前記  $\mu$  利用率を乗算して各車輪で利用するタイヤ発生力の大きさを設定するタイヤ発生力大きさ設定手段と、

各車輪で発生したタイヤ発生力の合力として車体に作用する発生合力の方向を基準とした各車輪で発生するタイヤ発生力の方向を、方向を求める対象車輪の位置から他の車輪までの前記発生合力の方向の距離と該他の車輪の前記タイヤ発生力の大きさとの積を他の車輪の全てについて加算した和に基づいて各々設定するタイヤ発生力方向設定手段と、

設定されたタイヤ発生力の大きさ及び方向に基づいて、各車輪の操舵角と制動力及び駆動力の少なくとも一方とを制御する制御手段と、  
を含む車両制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、車両制御方法及び車両制御装置に係り、特に、4輪独立に操舵角及び制駆動力を制御してタイヤ発生力が制御可能な車両、及び前後輪独立に操舵角及びタイヤ発生力が制御可能な車両等を制御するための車両制御方法及び車両制御装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

4輪の全てを制御対象とし、4輪独立に操舵角を制御する従来技術としては、特開2001-322557号公報記載の技術が知られている。この従来技術には、旋回中に各車輪の操舵角が車両旋回中心に対して直角になるように操舵すると共に、失陥輪が生じた場合には失陥輪の摩擦力を低減するように操舵とブレーキ制御とを行うことが開示されている。この従来技術では、操舵と制動または駆動との協調については言及されておらず、例えば操舵角は、制駆動に関わらず一定の値を目標値として出力している。

【0003】

【特許文献1】

特開2001-322557号公報

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、実際の車両では、タイヤと路面との間の摩擦限界が存在し、制駆動力を増加させることによって横力が減少する等の影響がある。このため、タイヤと路面と間の摩擦力を最大限有効に利用するためには、操舵と制動または操舵と駆動との協調が不可欠であるが、上記従来技術には、制駆動に応じて操舵を修正させる等の両者の協調に関しては何ら言及されておらず、タイヤ発生力を最

大限利用できない、という問題が生じる。

【0005】

本発明は、上記問題点を解消するためになされたもので、操舵と制動または操舵と駆動との協調制御を行なう車両制御方法及び車両制御装置を提供することを目的とする。

【0006】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するために本発明の車両制御方法は、ドライバが望む車体運動を得るために車体に加えるべき目標合成力と各車輪の限界摩擦円の大きさに基づいて、各車輪の $\mu$ 利用率を最適化するタイヤ発生力の大きさ及び方向を各車輪毎に求め、求めたタイヤ発生力の大きさ及び方向に基づいて、各車輪の操舵角と制動力及び駆動力の少なくとも一方とを制御することを特徴とする。

【0007】

前記限界摩擦円の大きさは各輪の $\mu$ 推定値または仮想 $\mu$ 値及び各輪荷重に基づいて求めることができる。

【0008】

上記各車輪の前記タイヤ発生力の大きさは、前記目標合成力と前記各車輪の限界摩擦円の大きさから得られる限界合成力との比で表される $\mu$ 利用率と、各車輪の前記限界摩擦円の大きさとを乗算して求めることができる。

【0009】

上記各車輪の前記タイヤ発生力の方向は、前記目標合成力と前記限界摩擦円の大きさをパラメータとして含む車輪数より少ない線形化された代数方程式に基づいて求めることができる。

【0010】

また、上記各車輪の $\mu$ 利用率を最適化するタイヤ発生力の大きさ及び方向は、各車輪の $\mu$ 利用率を均等に最小化するタイヤ発生力の大きさ及び方向、前後輪の $\mu$ 利用率が異なるようにするタイヤ発生力の大きさ及び方向、各車輪のタイヤ発生力の大きさが輪荷重に比例するようにするタイヤ発生力の大きさ及び方向とすることができる。



## 【0011】

ここで、各車輪の路面 $\mu$ が異なるために輪荷重に比例するタイヤ発生力の大きさが得られない場合には、低 $\mu$ 輪については限界摩擦円の大きさをタイヤ発生力の大きさとして用い、高 $\mu$ 輪については $\mu$ 利用率を最小とするタイヤ発生力の大きさを用いることができる。

## 【0012】

本発明では、左右の車輪で操舵角が同一になるように制御することができる。

## 【0013】

本発明の車両制御装置は、ドライバが望む車体運動を得るために車体に加えるべき目標合成力を演算する目標合成力演算手段と、各車輪の限界摩擦円の大きさを推定する限界摩擦円推定手段と、前記目標合成力と前記各車輪の限界摩擦円の大きさとに基づいて、各車輪の $\mu$ 利用率を最適化するタイヤ発生力の大きさ及び方向を各車輪毎に演算するタイヤ発生力演算手段と、演算されたタイヤ発生力の大きさ及び方向に基づいて、各車輪の操舵角と制動力及び駆動力の少なくとも一方とを制御する制御手段と、を含んで構成することができる。

## 【0014】

また、ドライバが望む車体運動を得るために車体に加えるべき目標合成力を演算する演算手段と、各車輪の限界摩擦円の大きさを推定する限界摩擦円推定手段と、前記限界摩擦円推定手段で推定された各車輪の限界摩擦円の大きさに基づいて、限界合成力を推定する限界合成力推定手段と、前記目標合成力と前記限界合成力との比を $\mu$ 利用率として設定する $\mu$ 利用率設定手段と、各車輪の前記限界摩擦円の大きさに前記 $\mu$ 利用率を乗算して各車輪で利用するタイヤ発生力の大きさを設定するタイヤ発生力大きさ設定手段と、各車輪で発生したタイヤ発生力の合力として車体に作用する発生合力の方向を基準とした各車輪で発生するタイヤ発生力の方向を、方向を求める対象車輪の位置から他の車輪までの前記発生合力の方向の距離と該他の車輪の前記タイヤ発生力の大きさとの積を他の車輪の全てについて加算した和に基づいて各々設定するタイヤ発生力方向設定手段と、設定されたタイヤ発生力の大きさ及び方向に基づいて、各車輪の操舵角と制動力及び駆動力の少なくとも一方とを制御する制御手段と、を含んで構成することができる。

## 【0015】

## 【発明の実施の形態】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。まず、4輪独立に操舵と制動、及び操舵と駆動が可能な車両における操舵と制動、及び操舵と駆動の協調制御の原理について説明する。

## 【0016】

図1に示す4輪車両運動モデルについて、4輪の各々で発生するタイヤ発生力の合力として車体に加えられる力（発生合力）の方向 $\theta$ （車両前後方向を基準とした角度）と各車輪の限界摩擦円の大きさ（半径） $F_i$ （ただし、 $i=1\sim 4$ であり、 $i=1$ は左前輪、 $i=2$ は右前輪、 $i=3$ は左後輪、 $i=4$ は右後輪を各々表している。）が既知である場合に、目的とするヨーモーメントを確保しつつ、最大の発生合力、すなわち車体に発生する加速度（または減速度）を最大にするための各車輪のタイヤ発生力の方向を求める。この各車輪のタイヤ発生力の方向は、発生合力方向と単輪発生力（各車輪のタイヤ発生力）との成す角度 $q_i$ で表す。

## 【0017】

なお、限界摩擦円は、タイヤがグリップを失わないで車両の運動性能を制御できる限界を表す円であり、限界摩擦円の大きさは車輪と路面との間に生じるタイヤ摩擦力の最大値を表しており、各輪の $\mu$ 推定値または仮想 $\mu$ 値と各輪の荷重に基づいて求めることができる。タイヤの摩擦力は、進行方向（駆動力）と横方向（右方向または左方向）の摩擦力との合成であり、何れかの方向の摩擦力が100%、すなわち限界摩擦円の大きさに一致した場合、他方向の摩擦力はゼロになる。この摩擦力の範囲をベクトル図で現わすと、図3に示すように略円形で表現できることから限界摩擦円と呼ばれている。なお、制動力は駆動力と逆方向になる。

## 【0018】

ところで、図1の4輪車両運動モデルについて、図2に示すように発生合力の方向を $x$ 軸、 $x$ 軸に垂直な方向を $y$ 軸とする座標変換を実施すると、各タイヤの位置 $(x, y) = (b_i, a_i)$ は、以下の式で表すことができる。

【0019】

【数1】

$$a_1 = \frac{T_f}{2} \cos \theta - L_f \sin \theta \quad (1)$$

$$a_2 = -\frac{T_f}{2} \cos \theta - L_f \sin \theta \quad (2)$$

$$a_3 = \frac{T_r}{2} \cos \theta + L_r \sin \theta \quad (3)$$

$$a_4 = -\frac{T_r}{2} \cos \theta + L_r \sin \theta \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{T_f}{2} \sin \theta + L_f \cos \theta \quad (5)$$

$$b_2 = -\frac{T_f}{2} \sin \theta + L_f \cos \theta \quad (6)$$

$$b_3 = \frac{T_r}{2} \sin \theta - L_r \cos \theta \quad (7)$$

$$b_4 = -\frac{T_r}{2} \sin \theta - L_r \cos \theta \quad (8)$$

【0020】

ただし、 $T_f$ は前輪間の間隔、 $T_r$ は後輪間の間隔、 $L_f$ は車両重心から前輪間の中点までの距離、 $L_r$ は車両重心から後輪間の中点までの距離であり、 $a_i$ はx軸からの距離、 $b_i$ はy軸からの距離を各々表している。

【0021】

また、現時点の車両重心周りで発生すべきヨーモーメントを $M_z$ とすると、各車輪のタイヤ発生力の方向を示す角度 $q_i$ には、以下の拘束条件が存在することになる。

【0022】

【数 2】

$$F_1 \sin q_1 + F_2 \sin q_2 + F_3 \sin q_3 + F_4 \sin q_4 = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & -a_1 F_1 \cos q_1 - a_2 F_2 \cos q_2 - a_3 F_3 \cos q_3 - a_4 F_4 \cos q_4 \\ & + b_1 F_1 \sin q_1 + b_2 F_2 \sin q_2 + b_3 F_3 \sin q_3 + b_4 F_4 \sin q_4 = M_z \end{aligned} \quad (10)$$

【0 0 2 3】

(9) 式は、y 方向には合力が発生しないことを拘束条件で表したものであり、(10) 式は車両重心回りのモーメントがヨーモーメント  $M_z$  であることを拘束条件で表したものである。

【0 0 2 4】

したがって、発生合力を最大化する問題は、(9)、(10) 式の拘束条件を満足し、かつ以下の (11) 式で表される x 軸方向の力の和  $J$  を最大化する角度  $q_i$  を求める問題となる。

【0 0 2 5】

【数 3】

$$J = F_1 \cos q_1 + F_2 \cos q_2 + F_3 \cos q_3 + F_4 \cos q_4 \quad (11)$$

【0 0 2 6】

この問題は、非線形の最適化問題として数値的な収束演算によって求めることが可能であるが、以下で説明するように近似による解の導出が可能である。

【0 0 2 7】

まず、(9)、(10) 式を 1 次近似すると次式が得られる。

【0 0 2 8】

【数 4】

$$F_1 q_1 + F_2 q_2 + F_3 q_3 + F_4 q_4 = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & b_1 F_1 q_1 + b_2 F_2 q_2 + b_3 F_3 q_3 + b_4 F_4 q_4 \\ & = M_z + a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4 \end{aligned} \quad (13)$$

【0029】

また、(11)式については2次近似によって次式が得られる。

【0030】

【数5】

$$J = F_1 - \frac{F_1}{2} q_1^2 + F_2 - \frac{F_2}{2} q_2^2 + F_3 - \frac{F_3}{2} q_3^2 + F_4 - \frac{F_4}{2} q_4^2 \quad (14)$$

【0031】

さらに、(14)式を最大化する角度  $q_i$  を求める問題は、(14)式において負の符号を有する項の和 ( $K/2$ ) を最小にする角度  $q_i$  を求める問題、すなわち (15) 式を最小化する角度  $q_i$  を求める問題に置き換えることができる。

【0032】

【数6】

$$K = F_1 q_1^2 + F_2 q_2^2 + F_3 q_3^2 + F_4 q_4^2 \quad (15)$$

【0033】

ここで、次の (16) 式を用いて変数変換を行なうと、

【0034】

【数7】

$$p_i = \sqrt{F_i} q_i \quad (16)$$

【0035】

(15) 式は、下記 (17) 式に示すようになり、

【0036】

【数8】

$$K = p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 \quad (17)$$

【0037】

結局、

【0038】

【数 9】

$$\sqrt{F_1} p_1 + \sqrt{F_2} p_2 + \sqrt{F_3} p_3 + \sqrt{F_4} p_4 = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & b_1 \sqrt{F_1} p_1 + b_2 \sqrt{F_2} p_2 + b_3 \sqrt{F_3} p_3 + b_4 \sqrt{F_4} p_4 \\ & = M_z + a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4 \end{aligned} \quad (19)$$

【0039】

(18) 式及び (19) 式を満足するユークリッドノルム最小の  $p_i$  を求める問題に置き換えられ、次式のように解くことができる。

【0040】

【数 10】

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} &= \text{diag} \left[ \frac{1}{\sqrt{F_1}}, \frac{1}{\sqrt{F_2}}, \frac{1}{\sqrt{F_3}}, \frac{1}{\sqrt{F_4}} \right] \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \\ &= \text{diag} \left[ \frac{1}{\sqrt{F_1}}, \frac{1}{\sqrt{F_2}}, \frac{1}{\sqrt{F_3}}, \frac{1}{\sqrt{F_4}} \right] \begin{bmatrix} \sqrt{F_1} & \sqrt{F_2} & \sqrt{F_3} & \sqrt{F_4} \\ b_1 \sqrt{F_1} & b_2 \sqrt{F_2} & b_3 \sqrt{F_3} & b_4 \sqrt{F_4} \\ 0 & & & \\ M_z + a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4 & & & \end{bmatrix}^+ \\ &= \frac{M_z + a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4}{b_1 c_1 F_1 + b_2 c_2 F_2 + b_3 c_3 F_3 + b_4 c_4 F_4} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(20)

【0041】

ただし、

【0042】

【数 1 1】

$$c_1 = (b_1 - b_2) F_2 + (b_1 - b_3) F_3 + (b_1 - b_4) F_4 \quad (21)$$

$$c_2 = (b_2 - b_1) F_1 + (b_2 - b_3) F_3 + (b_2 - b_4) F_4 \quad (22)$$

$$c_3 = (b_3 - b_1) F_1 + (b_3 - b_2) F_2 + (b_3 - b_4) F_4 \quad (23)$$

$$c_4 = (b_4 - b_1) F_1 + (b_4 - b_2) F_2 + (b_4 - b_3) F_3 \quad (24)$$

【0 0 4 3】

である。

【0 0 4 4】

また、(20) 式の diag は括弧内の値を対角要素とする対角行列を表し、+ は擬似逆行列を表している。なお、A が横長フルランクの行列の場合、A の擬似逆行列は、

【0 0 4 5】

【数 1 2】

$$A^+ = (A \cdot A^T)^{-1} A^T \quad (25)$$

【0 0 4 6】

で演算できる。

【0 0 4 7】

上記 (20) 式～(24) 式によって導出された角度  $q_i$  は、直接各車輪の発生力方向として操舵角と制動力または操舵角と駆動力の統合制御に利用することができる。

【0 0 4 8】

また、上記のようにして導出された角度  $q_i$  は、上記 (9) 式～(11) 式の非線形最適化における収束演算の初期値として利用することもできる。一般に、非線形最適化問題では、初期値を最適値の近傍に取ることによって収束演算の収束が速くなるという性質があり、(20) 式～(24) 式の解を初期値として利用することによって演算効率を高めることができる。

【0 0 4 9】

また、(21)式～(24)式は、角度 $q_i$ を求める車輪の位置から他の車輪までの車体合成力方向の距離と限界摩擦円の大きさとの積を他の車輪全てについて加算した和を各々表している。したがって、各車輪の力の方向の車体合成力方向に対する角度 $q_i$ は、各々の輪の位置から他の輪までの車体合成力方向の距離と限界摩擦円の大きさとの積を他の車輪全てについて加算した和に比例していることを表している。

#### 【0050】

さらに、各車輪の位置を表す $a_i$ 、 $b_i$ が、車体合成力方向 $\theta$ の関数であるので、各車輪の力の方向の車体合成力方向に対する角度 $q_i$ は、車体合成力方向と各輪の限界摩擦円の大きさの関数として表すことができる。

#### 【0051】

ところで、ここでの非線形最適化問題は、(20)～(24)で導出された近似解を中心に(9)、(10)式をテーラー展開して解を導出し、再びこの解を中心としたテーラー展開と解の導出を繰り返すことによっても精度の良い近似解として求めることができる。(9)、(10)式を $q_{i0}$ 中心にテーラー展開すると次式が導出される。

#### 【0052】

#### 【数13】

$$F_1\{\sin q_{10} + (q_1 - q_{10})\cos q_{10}\} + F_2\{\sin q_{20} + (q_2 - q_{20})\cos q_{20}\} \\ + F_3\{\sin q_{30} + (q_3 - q_{30})\cos q_{30}\} + F_4\{\sin q_{40} + (q_4 - q_{40})\cos q_{40}\} = 0 \quad (26)$$

$$- a_1 F_1\{\cos q_{10} - (q_1 - q_{10})\sin q_{10}\} - a_2 F_2\{\cos q_{20} - (q_2 - q_{20})\sin q_{20}\} \\ - a_3 F_3\{\cos q_{30} - (q_3 - q_{30})\sin q_{30}\} - a_4 F_4\{\cos q_{40} - (q_4 - q_{40})\sin q_{40}\} \\ + b_1 F_1\{\sin q_{10} + (q_1 - q_{10})\cos q_{10}\} + b_2 F_2\{\sin q_{20} + (q_2 - q_{20})\cos q_{20}\} \\ + b_3 F_3\{\sin q_{30} + (q_3 - q_{30})\cos q_{30}\} + b_4 F_4\{\sin q_{40} + (q_4 - q_{40})\cos q_{40}\} \\ = M_z \quad (27)$$

#### 【0053】

これらを満足し、(15)式を最小化する解は、擬似逆行列を使用し、以下の



式のように導出することができる。

【0054】

【数14】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \text{diag} \left[ \frac{1}{\sqrt{F_1}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_2}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_3}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_4}} \right] \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{F_1} \cos q_{10} & \sqrt{F_2} \cos q_{20} \\ \sqrt{F_1} (a_1 \sin q_{10} + b_1 \cos q_{10}) & \sqrt{F_2} (a_2 \sin q_{20} + b_2 \cos q_{20}) \\ \sqrt{F_3} \cos q_{30} & \sqrt{F_4} \cos q_{40} \\ \sqrt{F_3} (a_3 \sin q_{30} + b_3 \cos q_{30}) & \sqrt{F_4} (a_4 \sin q_{40} + b_4 \cos q_{40}) \end{bmatrix}^+ \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i (q_{i0} \cos q_{i0} - \sin q_{i0}) \\ M_z + \sum_{i=1}^4 F_i \{ (a_i + b_i q_{i0}) \cos q_{i0} + (a_i q_{i0} - b_i) \sin q_{i0} \} \end{bmatrix} \quad (28)$$

【0055】

この(28)式を漸化式として繰り返し演算を行う、すなわち前ステップで演算された $q_i$ を次ステップの $q_{i0}$ として使用することで、最適化の精度を向上させることができる。

【0056】

次に限界前の操舵・制駆動制御の協調について説明する。上記では、限界運動性能(車体力)を向上させるための操舵系と制駆動系の協調について説明した。ここでは、この制御則を限界前の領域に拡張し、各輪のグリップ余裕を最大化する協調法について説明する。

【0057】

各輪の $\mu$ 利用率を $\gamma$ とした場合、車体発生力の横方向とヨー方向の拘束条件は

【0058】

【数 15】

$$\gamma F_1 \sin q_1 + \gamma F_2 \sin q_2 + \gamma F_3 \sin q_3 + \gamma F_4 \sin q_4 = 0$$

$$- a_1 \gamma F_1 \cos q_1 - a_2 \gamma F_2 \cos q_2 - a_3 \gamma F_3 \cos q_3 - a_4 \gamma F_4 \cos q_4 \\ + b_1 \gamma F_1 \sin q_1 + b_2 \gamma F_2 \sin q_2 + b_3 \gamma F_3 \sin q_3 + b_4 \gamma F_4 \sin q_4 = M_z$$

【0059】

すなわち

【0060】

【数 16】

$$F_1 \sin q_1 + F_2 \sin q_2 + F_3 \sin q_3 + F_4 \sin q_4 = 0 \quad (29)$$

$$- a_1 F_1 \cos q_1 - a_2 F_2 \cos q_2 - a_3 F_3 \cos q_3 - a_4 F_4 \cos q_4 \\ + b_1 F_1 \sin q_1 + b_2 F_2 \sin q_2 + b_3 F_3 \sin q_3 + b_4 F_4 \sin q_4 = \frac{M_z}{\gamma} \quad (30)$$

【0061】

と表される。また、車体発生力の大きさを拘束条件として表すと、

【0062】

【数 17】

$$\gamma F_1 \cos q_1 + \gamma F_2 \cos q_2 + \gamma F_3 \cos q_3 + \gamma F_4 \cos q_4 = F$$

【0063】

すなわち、

【0064】

【数 18】

$$F_1 \cos q_1 + F_2 \cos q_2 + F_3 \cos q_3 + F_4 \cos q_4 = \frac{F}{\gamma} \quad (31)$$

【0065】

となる。したがって、各輪のグリップ余裕を均一に最大化する協調法は (29)

- (31) を満足し、 $\mu$  利用率  $\gamma$  を最小にする  $q_i$  を求める問題となる。また、

この問題は、 $F \neq 0$  のときには (30), (31) 式を整理することによって、

【0066】

【数19】

$$\begin{aligned} & b_1 F_1 \sin q_1 + b_2 F_2 \sin q_2 + b_3 F_3 \sin q_3 + b_4 F_4 \sin q_4 \\ &= \left( a_1 + \frac{M_z}{F} \right) F_1 \cos q_1 + \left( a_2 + \frac{M_z}{F} \right) F_2 \cos q_2 \\ &+ \left( a_3 + \frac{M_z}{F} \right) F_3 \cos q_3 + \left( a_4 + \frac{M_z}{F} \right) F_4 \cos q_4 \end{aligned} \quad (32)$$

【0067】

と (29) 式を満足しかつ、

【0068】

【数20】

$$J = \frac{F}{\gamma} = F_1 \cos q_1 + F_2 \cos q_2 + F_3 \cos q_3 + F_4 \cos q_4 \quad (33)$$

【0069】

を最大化する  $q_i$  を求める問題と考えることもできる。上記で説明したのと同様に近似解の導出を考える場合、(29), (32) 式は、以下の式のようにになる。

【0070】

【数21】

$$F_1 q_1 + F_2 q_2 + F_3 q_3 + F_4 q_4 = 0 \quad (34)$$

$$\begin{aligned} & b_1 F_1 q_1 + b_2 F_2 q_2 + b_3 F_3 q_3 + b_4 F_4 q_4 = \\ & \left( a_1 + \frac{M_z}{F} \right) F_1 + \left( a_2 + \frac{M_z}{F} \right) F_2 + \left( a_3 + \frac{M_z}{F} \right) F_3 + \left( a_4 + \frac{M_z}{F} \right) F_4 \end{aligned} \quad (35)$$

【0071】

また (33) 式は、(14) 式に一致する。このため、上記と同様に (16) 式の変数変換を実施し、

【0072】

【数 2 2】

$$\sqrt{F_1}p_1 + \sqrt{F_2}p_2 + \sqrt{F_3}p_3 + \sqrt{F_4}p_4 = 0 \quad (36)$$

$$b_1\sqrt{F_1}p_1 - b_2\sqrt{F_2}p_2 + b_3\sqrt{F_3}p_3 + b_4\sqrt{F_4}p_4 = \\ \left(a_1 + \frac{M_z}{F}\right)F_1 + \left(a_2 + \frac{M_z}{F}\right)F_2 + \left(a_3 + \frac{M_z}{F}\right)F_3 + \left(a_4 + \frac{M_z}{F}\right)F_4 \quad (37)$$

【0073】

を満足するユークリッドノルム最小の  $p_i$  を求める問題に置き換えられ、次式のように解くことができる。

【0074】

【数 2 3】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \text{diag} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{F_1}} & \frac{1}{\sqrt{F_2}} & \frac{1}{\sqrt{F_3}} & \frac{1}{\sqrt{F_4}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \\ = \text{diag} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{F_1}} & \frac{1}{\sqrt{F_2}} & \frac{1}{\sqrt{F_3}} & \frac{1}{\sqrt{F_4}} \end{bmatrix} \\ \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{F_1} & \sqrt{F_2} & \sqrt{F_3} & \sqrt{F_4} \\ b_1\sqrt{F_1} & b_2\sqrt{F_2} & b_3\sqrt{F_3} & b_4\sqrt{F_4} \end{bmatrix}^+ \\ \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_z}{F}(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) + a_1F_1 + a_2F_2 + a_3F_3 + a_4F_4 \end{bmatrix} \\ = \frac{\frac{M_z}{F}(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) + a_1F_1 + a_2F_2 + a_3F_3 + a_4F_4}{b_1c_1F_1 + b_2c_2F_2 + b_3c_3F_3 + b_4c_4F_4} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (38)$$

【0075】

ただし、

【0076】

【数 2 4】

$$c_1 = (b_1 - b_2)F_2 + (b_1 - b_3)F_3 + (b_1 - b_4)F_4 \quad (39)$$

$$c_2 = (b_2 - b_1)F_1 + (b_2 - b_3)F_3 + (b_2 - b_4)F_4 \quad (40)$$

$$c_3 = (b_3 - b_1)F_1 + (b_3 - b_2)F_2 + (b_3 - b_4)F_4 \quad (41)$$

$$c_4 = (b_4 - b_1)F_1 + (b_4 - b_2)F_2 + (b_4 - b_3)F_3 \quad (42)$$

【0077】

である。また、上記で説明したように  $\text{diag}$  は対角行列を、 $+$  は擬似逆行列を表している。(38) - (42) 式によって導出された  $q_i$  は直接各輪の発生力方向として操舵と制動または操舵と駆動の統合制御に利用することもできるし、(29) - (31) 式 of 非線形最適化における収束演算の初期値として利用することもできる。なお、上記で説明したのと同様にテーラー展開に基づく繰り返し演算によって精度の良い近似解を求める漸化式は、次式のように与えられる。

【0078】

【数 2 5】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \text{diag} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{F_1}} & \frac{1}{\sqrt{F_2}} & \frac{1}{\sqrt{F_3}} & \frac{1}{\sqrt{F_4}} \end{bmatrix} \cdot \left[ \begin{array}{cc} \sqrt{F_1} \cos q_{10} & \sqrt{F_2} \cos q_{20} \\ \sqrt{F_1} (a_1 \sin q_{10} + b_1 \cos q_{10}) & \sqrt{F_2} (a_2 \sin q_{20} + b_2 \cos q_{20}) \\ \sqrt{F_3} \cos q_{30} & \sqrt{F_4} \cos q_{40} \\ \sqrt{F_3} (a_3 \sin q_{30} + b_3 \cos q_{30}) & \sqrt{F_4} (a_4 \sin q_{40} + b_4 \cos q_{40}) \end{array} \right]^+ \cdot \left[ \begin{array}{c} \sum_{i=1}^4 F_i (q_{i0} \cos q_{i0} - \sin q_{i0}) \\ \sum_{i=1}^4 F_i \left\{ \left( a_i + b_i q_{i0} + \frac{M_z}{F} \right) \cos q_{i0} + (a_i q_{i0} - b_i) \sin q_{i0} \right\} \end{array} \right] \quad (43)$$

【0079】

なお、 $\mu$  利用率  $\gamma$  は、こうして導出された  $q_i$  から

【 0 0 8 0 】

【数 2 6】

$$\gamma = \frac{F}{F_1 \cos q_1 + F_2 \cos q_2 + F_3 \cos q_3 + F_4 \cos q_4} \quad (44)$$

【 0 0 8 1 】

に基づき演算される。また、各輪の制駆動力は、各輪の発生力の大きさ  $F_i$  及び方向  $q_i + \theta$  から

【 0 0 8 2 】

【数 2 7】

$$F_{x_i} = \gamma F_i \cos(q_i + \theta) \quad (45)$$

【 0 0 8 3 】

と導出できる。また、同様に各輪の横力は、

【 0 0 8 4 】

【数 2 8】

$$F_{y_i} = \gamma F_i \sin(q_i + \theta) \quad (46)$$

【 0 0 8 5 】

と導出できる。各輪の舵角は、例えばブラッシュモデルと車両運動モデルに基づいて演算することができる。ブラッシュモデルは、タイヤ発生力特性を理論式に基づいて記述したモデルであり、タイヤ発生力がブラッシュモデルに従って発生すると仮定すると、限界摩擦力  $F_i$ 、 $\mu$  利用率  $\gamma$ 、発生力の方向  $(q_i + \theta)$  からスリップ角  $\beta_i$  を以下のように求めることができる。

【 0 0 8 6 】

【数 2 9】

$$\beta_i = \tan^{-1} \left( \frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_i \sin(q_i + \theta)}{1 - k_i \cos(q_i + \theta)} \right) \quad (47)$$

【 0 0 8 7 】

ただし、

【0088】

【数30】

$$k_i = \frac{3 F_i}{K_s} \left( 1 - (1 - \gamma)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (48)$$

【0089】

ここで、 $K_s$ ：ドライビングステイッフネス、 $K_\beta$ ：コーナリングステイッフネスである。さらに各輪の舵角は、スリップ角から車両運動モデルに基づいて演算される。すなわち、車速 $v$ 、操舵角、アクセル開度、ブレーキ踏力などから目標となる車両運動状態量として演算されるヨー角速度 $r_0$ 、車体スリップ角 $\beta_0$ から以下のように演算することができる。

【0090】

【数31】

$$\delta_1 = \beta_0 + \frac{L_f}{v} r_0 - \beta_1 \quad (49)$$

$$\delta_2 = \beta_0 + \frac{L_f}{v} r_0 - \beta_2 \quad (50)$$

$$\delta_3 = \beta_0 - \frac{L_f}{v} r_0 - \beta_3 \quad (51)$$

$$\delta_4 = \beta_0 - \frac{L_f}{v} r_0 - \beta_4 \quad (52)$$

【0091】

この制御に基づく操舵制御と制駆動制御との協調を実施した場合、常に各輪の $\mu$ 利用率を均等に最小化することが可能となり、路面や横風などの外乱に対し最も余裕のある運動性能を示すことが可能である。

【0092】

次に、通常の4輪操舵車へ適応して左右同操舵角で制御する場合について説明する。左右輪の操舵角が一致している従来の4輪操舵車の場合、左右輪のスリップ角が一致するという以下の拘束条件が付加されることになる。

【0093】

【数 3 2】

$$\tan^{-1}\left(\frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_1 \sin(q_1+\theta)}{1-k_1 \cos(q_1+\theta)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_2 \sin(q_2+\theta)}{1-k_2 \cos(q_2+\theta)}\right) \quad (53)$$

$$\tan^{-1}\left(\frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_3 \sin(q_3+\theta)}{1-k_3 \cos(q_3+\theta)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_4 \sin(q_4+\theta)}{1-k_4 \cos(q_4+\theta)}\right) \quad (54)$$

【0094】

これらの拘束条件は、

【0095】

【数 3 3】

$$k_2 \sin(q_2+\theta) - k_1 \sin(q_1+\theta) - k_1 k_2 \sin(q_2 - q_1) = 0 \quad (55)$$

$$k_4 \sin(q_4+\theta) - k_3 \sin(q_3+\theta) - k_3 k_4 \sin(q_4 - q_3) = 0 \quad (56)$$

【0096】

と整理することが可能であり、さらに1次近似すると

【0097】

【数 3 4】

$$-k_1(\cos\theta - k_2)q_1 + k_2(\cos\theta - k_1)q_2 = (k_1 - k_2)\sin\theta \quad (57)$$

$$-k_3(\cos\theta - k_4)q_3 + k_4(\cos\theta - k_3)q_4 = (k_3 - k_4)\sin\theta \quad (58)$$

【0098】

と表される。ここで、 $\mu$  利用率1の車体力最大化時には、

【0099】

【数 3 5】

$$F_1 \sin q_1 + F_2 \sin q_2 + F_3 \sin q_3 + F_4 \sin q_4 = 0 \quad (59)$$

$$\begin{aligned} & -a_1 F_1 \cos q_1 - a_2 F_2 \cos q_2 - a_3 F_3 \cos q_3 - a_4 F_4 \cos q_4 \\ & + b_1 F_1 \sin q_1 + b_2 F_2 \sin q_2 + b_3 F_3 \sin q_3 + b_4 F_4 \sin q_4 = M_z \end{aligned} \quad (60)$$

【0100】

という拘束条件が存在することから、近似解は、



【0101】

【数36】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \\ b_1 F_1 & b_2 F_2 & b_3 F_3 \\ -k_1(\cos\theta - k_2) & k_2(\cos\theta - k_1) & 0 \\ 0 & 0 & -k_3(\cos\theta - k_4) \\ F_4 & & \\ b_4 F_4 & & \\ 0 & & \\ k_4(\cos\theta - k_3) & & \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ M_z + a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4 \\ (k_1 - k_2)\sin\theta \\ (k_3 - k_4)\sin\theta \end{bmatrix} \quad (61)$$

【0102】

と導出される。また、 $\mu$  利用率が1以下の状態で車体力Fが与えられた場合には、(60)式の代わりに(32)式が用いられるとともに、

【0103】

【数37】

$$\gamma = \frac{F}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

【0104】

とすることによって近似解は、

【0105】

【数38】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 & F_4 \\ b_1 F_1 & b_2 F_2 & b_3 F_3 & b_4 F_4 \\ -k_1(\cos\theta - k_2) & k_2(\cos\theta - k_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3(\cos\theta - k_4) & k_4(\cos\theta - k_3) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_z}{F}(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) + a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4 \\ (k_1 - k_2)\sin\theta \\ (k_1 - k_2)\sin\theta \end{bmatrix} \quad (62)$$

【0106】

と導出される。また、このときの各輪の摩擦力及び操舵角は、(45)、(47)～(52)式によって演算される。ただし、(46)～(49)式において左右輪の操舵角は同じ値が演算される。なお、(61)、(62)式は、1次近似によって導出されたものであり、これを初期値として対応する非線形方程式を数値的に求めこの解に基づく制御を行なうこともできる。なお、前述のテーラ展開を利用した繰り返し演算を(61)式に適用した場合、

【0107】

【数39】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \cos q_{10} & F_2 \cos q_{20} \\ a_1 F_1 \sin q_{10} + b_1 F_1 \cos q_{10} & a_2 F_2 \sin q_{20} + b_2 F_2 \cos q_{20} \\ -k_1 \{ \cos(q_{10} + \theta) - k_2 \cos(q_{20} - q_{10}) \} & k_2 \{ \cos(q_{20} + \theta) - k_1 \cos(q_{20} - q_{10}) \} \\ 0 & 0 \\ a_3 F_3 \sin q_{30} + b_3 F_3 \cos q_{30} & a_4 F_4 \sin q_{40} + b_4 F_4 \cos q_{40} \\ -k_3 \{ \cos(q_{30} + \theta) - k_4 \cos(q_{40} - q_{30}) \} & k_4 \{ \cos(q_{40} + \theta) - k_3 \cos(q_{40} - q_{30}) \} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i (q_{i0} \cos q_{i0} - \sin q_{i0}) \\ M_z + \sum_{i=1}^4 F_i \{ (a_i + b_i q_{i0}) \cos q_{i0} + (a_i q_{i0} - b_i) \sin q_{i0} \} \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (63)$$

【0108】

ただし、

【0109】

【数40】

$$\begin{aligned} d_1 &= k_1 \{ \sin(q_{10} + \theta) - q_{10} \cos(q_{10} + \theta) \} \\ &\quad - k_2 \{ \sin(q_{20} + \theta) - q_{20} \cos(q_{20} + \theta) \} \\ &\quad + k_1 k_2 \{ \sin(q_{20} - q_{10}) - (q_{20} - q_{10}) \cos(q_{20} - q_{10}) \} \\ d_2 &= k_3 \{ \sin(q_{30} + \theta) - q_{30} \cos(q_{30} + \theta) \} \\ &\quad - k_4 \{ \sin(q_{40} + \theta) - q_{40} \cos(q_{40} + \theta) \} \\ &\quad + k_3 k_4 \{ \sin(q_{40} - q_{30}) - (q_{40} - q_{30}) \cos(q_{40} - q_{30}) \} \\ q_{i0} &: 1 \text{ ステップ前の値} \end{aligned}$$

【0110】

である。また、(62)式に適用した場合には、

【0111】

【数41】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \cos q_{10} & F_2 \cos q_{20} \\ a_1 F_1 \sin q_{10} + b_1 F_1 \cos q_{10} & a_2 F_2 \sin q_{20} + b_2 F_2 \cos q_{20} \\ -k_1 \{ \cos(q_{10} + \theta) - k_2 \cos(q_{20} - q_{10}) \} & k_2 \{ \cos(q_{20} + \theta) - k_1 \cos(q_{20} - q_{10}) \} \\ 0 & 0 \\ F_3 \cos q_{30} & F_4 \cos q_{40} \\ a_3 F_3 \sin q_{30} + b_3 F_3 \cos q_{30} & a_4 F_4 \sin q_{40} + b_4 F_4 \cos q_{40} \\ 0 & 0 \\ -k_3 \{ \cos(q_{30} + \theta) - k_4 \cos(q_{40} - q_{30}) \} & k_4 \{ \cos(q_{40} + \theta) - k_3 \cos(q_{40} - q_{30}) \} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i (q_{i0} \cos q_{i0} - \sin q_{i0}) \\ \sum_{i=1}^4 F_i \left\{ \left( a_i + b_i q_{i0} + \frac{M_z}{F} \right) \cos q_{i0} + (a_i q_{i0} - b_i) \sin q_{i0} \right\} \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (64)$$

【0112】

となる。

【0113】

次に、上記の原理を利用した本実施の形態の第1の具体的構成を図4に基づいて説明する。図に示すように、本実施の形態は、目標合成力を演算する目標合成力演算手段18、各車輪の限界摩擦円の大きさ（半径）を各々推定する限界摩擦円推定手段20、目標合成力と各輪の限界摩擦円の大きさとに基づいて、各輪の発生力方向と $\mu$ 利用率とを演算する各輪発生力方向・ $\mu$ 利用率演算手段25、各車輪のタイヤ発生力を設定する各輪発生力設定手段28、及び協調制駆動装置に接続された制御手段30で構成される。

【0114】

目標合成力演算手段18は、操舵角、車速、アクセル開度、及びブレーキ踏力等からドライバの望む車体運動を得るために車体に加えられる合成力、及びヨーモーメントを演算する。これらの合成力、及びヨーモーメントは、例えば、ドライバ操作に応じて設定される目標となる車両運動状態量であるヨー角速度と車体スリップ角の実測値（または推定値）との偏差に応じて、この偏差を0に漸近さ

せるために必要な合成力及びヨーモーメントを演算することで求めることができる。

#### 【0115】

限界摩擦円推定手段20は、各車輪毎の限界摩擦円をSATや車輪速運動に基づいて推定する。

#### 【0116】

各輪発生力方向・ $\mu$ 利用率演算手段25は、目標合成力と各輪の限界摩擦円の大きさに基づいて、各輪の発生力方向と $\mu$ 利用率とを演算する。この演算では、各輪の $\mu$ 利用率が均等に最小化するようにタイヤ発生力の大きさ及びタイヤ発生力方向を演算する場合と、各輪の発生力が各輪の荷重配分に比例する配分で最小化するようにタイヤ発生力の大きさ及びタイヤ発生力方向を演算する場合とがある。

#### 【0117】

各車輪の路面 $\mu$ が異なるために輪荷重に比例するタイヤ発生力の大きさが演算できない場合には、低 $\mu$ 輪については限界摩擦円の大きさをタイヤ発生力の大きさとして用い、高 $\mu$ 輪については $\mu$ 利用率を最小とするタイヤ発生力の大きさを用いればよい。

#### 【0118】

各輪の発生力方向は、車輪数より少ない線形化された代数方程式に基づいて求めることができる。また、各輪の $\mu$ 利用率を均等に最小化させる場合には、上述したように、各車輪で発生したタイヤ発生力の合力として車体に作用する発生合力の方向の距離であって、方向を求める対象車輪の位置から他の車輪までの距離と、この他の車輪の限界摩擦円の大きさとの積を他の車輪の全てについて加算した和に基づいて求めることができる。

#### 【0119】

各輪発生力設定手段28は、各輪の発生力方向と $\mu$ 利用率を実現するために必要な各輪の舵角と制駆動力を演算する。

#### 【0120】

制御手段30は、各輪発生力設定手段28で演算された舵角と制駆動力を操舵

及び制駆動アクチュエータによって実現する。

#### 【0 1 2 1】

図 5 は、上記の第 1 の具体的構成によって、片側が路面  $\mu = 0.3$  の雪上路と もう片側が路面  $\mu = 1.0$  のドライ路面というまたぎ路面で直進制動を行ったときの制動加速度 [G] の比較をシミュレーションによって演算したものである。なお、4 輪独立操舵は、(28) 式、前後輪操舵は (63) 式に基づいた制御が行なわれており、4 輪独立操舵によって制動力が 8 % ほど増加することがわかる。

#### 【0 1 2 2】

図 6 は、(28)、(63) 式に基づいて演算される各輪の発生力方向の演算繰り返し回数を、図 7 は、収束後の各輪の発生力ベクトルと操舵角とを示したものである。

#### 【0 1 2 3】

図 6 より、各輪の発生力方向は、2、3 回の演算で収束することがわかる。また、図 7 より、4 輪独立操舵は、比較的余裕のある高  $\mu$  側の車輪でモーメントを打ち消す横力を発生させていることがわかる。

#### 【0 1 2 4】

ところで、図 7 における前後輪操舵は、摩擦円の縁（図 8 のタイヤ特性における  $k_a$ ）を利用する制御則となっているが、より深いスリップ領域（図 8 のタイヤ特性における  $k_b$ ）まで利用することを考慮すると、操舵角を変化させることなくタイヤ発生力の方向を変化させることができる。

#### 【0 1 2 5】

この場合、4 輪独立操舵の解である各輪のタイヤ力の方向を左右同舵角の前後輪操舵車両で実現することができ、以下のロジックによって 4 輪独立操舵と同等の車体発生加速度を得ることができる。

#### 【0 1 2 6】

まず、高  $\mu$  側のタイヤ発生力方向の演算値（4 輪独立操舵の制御則）に基づきスリップ角及び操舵角を求めると共に、高  $\mu$  側は、4 輪独立操舵時と同じ制駆動力を出力する。

【0127】

次に、高 $\mu$ 側のスリップ角とスリップ角が一致すると共に4輪独立操舵の制御則から演算されるタイヤ発生力方向を得るためのスリップ率を次のように求める。低 $\mu$ 側を添え字  $i$ 、高 $\mu$ 側を添え字  $j$  で表すと、左右輪のスリップ角が一致するという条件は、以下の式で表される。

【0128】

【数42】

$$\tan^{-1}\left(\frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_i \sin(q_i + \theta)}{1 - k_i \cos(q_i + \theta)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_j \sin(q_j + \theta)}{1 - k_j \cos(q_j + \theta)}\right) \quad (65)$$

【0129】

ただし、

【0130】

【数43】

$$k_j = \frac{3 F_j}{K_s}$$

【0131】

上記(65)式において、 $q_i$ 、 $q_j$ は、各々4輪独立操舵を仮定して導出された解(タイヤ発生力の方向)である。これを $k_i$ について解くと、

【0132】

【数44】

$$k_i = \frac{3 F_j \sin(q_j + \theta)}{K_s \sin(q_i + \theta) + 3 F_j \sin(q_j - q_i)} \quad (66)$$

【0133】

となり、スリップ率(前後方向)は、

【0134】

【数 4 5】

$$k_{xi} = k_i \cos(q_i + \theta) = \frac{3 F_j \sin(q_j + \theta) \cos(q_i + \theta)}{K_s \sin(q_i + \theta) + 3 F_j \sin(q_j - q_i)} \quad (67)$$

【0 1 3 5】

と演算される。

【0 1 3 6】

また、制駆動力は、以下の式で与えられる。

【0 1 3 7】

【数 4 6】

$$F_{xi} = F_i \cos(q_i + \theta) \quad (68)$$

【0 1 3 8】

図 9 は、旋回外輪が路面  $\mu = 0.8$  の湿潤路、旋回内輪が路面  $\mu = 1.0$  の乾燥路の路面において  $\theta = 120 \text{ deg}$  の方向に発生合力が作用するような旋回制動時の限界加速度 [G]（発生合力方向）の比較をシミュレーションによって演算したものである。

【0 1 3 9】

前後輪操舵は、左右同角で操舵される車両において前後輪の舵角と 4 輪の制動力とを (63) 式に基づいて求めたときの車両の加速度を示し、また、4 輪独立操舵は、(28) 式に基づいて各輪の発生力方向を求めたときの車両の加速度を示している。これらの図より、この条件下では 4 輪独立操舵によって車体の発生加速度が 5 % ほど増加することがわかる。

【0 1 4 0】

また、図 10 は、(28)、(63) 式に基づいて演算される各輪の発生力方向の演算繰り返し回数を、図 11 は、収束後の各輪の発生力ベクトルと操舵角とを示したものである。4 輪独立操舵の場合、路面  $\mu$  の小さな旋回外輪の舵角は内輪に比べて小さく出力されていることがわかる。なお、ここでのシミュレーションは、コーナリングパワー (CP) や横力の荷重依存性やサスジオメトリー変化

などは考慮されていない。

#### 【0141】

ところで、このシミュレーションにおいても図10における前後輪操舵は摩擦円の縁（図8のタイヤ特性における $k_a$ ）を利用する制御則となっているが、より深いスリップ領域（図8のタイヤ特性における $k_b$ ）まで利用することを考慮すると、操舵角を変化させることなくタイヤの発生力の方向を変化させることができるため、直進またぎ路面同様に左右同舵角制御の前後輪操舵車両においても、4輪独立操舵車両と同等の車体発生加速度を得ることが可能である。このように限界走行状態（ $\mu$ 利用率1）においては、摩擦円の縁以上の深いスリップ領域を利用することによって左右同舵角の前後輪操舵車両においても4輪独立操舵と同等の車体加速度を得ることができる。これは、タイヤ発生力を理論的に記述したブラッシュモデルに基づいて導出された結果であるが、実際のタイヤ特性では、深いスリップ領域で発生力が図12に示すように落ち込むこともあり、この場合には前後輪操舵車両で4輪独立操舵の解を実現する場合、車体発生加速度がこの分小さくなることになる。

#### 【0142】

図13は、路面 $\mu$ が0.85の均一路面において旋回制動を行ったときの4輪独立操舵、前後輪操舵車両の解（各輪、車体の発生力ベクトルと操舵角）を示したものである。このように均一 $\mu$ の路面においては、4輪独立操舵と前後輪操舵の差は生じず、双方ともに $q_i = 0$ という解が得られる。

#### 【0143】

このように均一 $\mu$ の路面では、4輪独立操舵と前後輪操舵との差は殆ど生じない、かつ各車輪の発生力方向 $q_i$ が比較的小さくなることを考慮すると、限界、限界前含め以下のような前後輪操舵の制御則を用いるようにしてもよい。

#### 【0144】

まず、限界前の走行状態では、各輪の路面 $\mu$ の最大値を利用し、路面 $\mu$ がこの最大値で均一の場合の制御を実行する。各輪の $\mu$ が不均一の場合には、実際に $\mu$ 利用率が均等にはならないものの、各輪のタイヤ発生力は各輪の荷重配分に比例した大きさとなり、各輪の発生力方向 $q_i$ は比較的小さくバランスの良い操舵、



制駆動の協調が期待できる。

【0145】

また、低 $\mu$ 側の車輪が限界に至った場合、すなわち、下記(69)式のような場合には、

【0146】

【数47】

$$F_{iReal} < \gamma F_i \quad (69)$$

【0147】

4輪独立操舵の制御則が利用される。ただし、 $\gamma$ は(64)式の漸化式の解 $q_i$ から演算された

【0148】

【数48】

$$\gamma = \frac{F_1 \cos q_1 + F_2 \cos q_2 + F_3 \cos q_3 + F_4 \cos q_4}{F} \quad (70)$$

【0149】

であり、 $F_i$ は、路面 $\mu$ を高 $\mu$ の値に仮定したときのタイヤ発生力の大きさ、 $F_{iReal}$ は、実際の低 $\mu$ 輪のタイヤ発生力の大きさである。このときには、4輪独立操舵の制御則導出過程における $\gamma F_i$ を $F_{iReal}$ として導出ができる。例えば、1、3輪（左前後輪）が限界に達した場合、各拘束条件は、

【0150】

【数49】

$$F_{1Real} \sin q_1 + \gamma F_2 \sin q_2 + F_{3Real} \sin q_3 + \gamma F_4 \sin q_4 = 0 \quad (71)$$

$$\begin{aligned} & -a_1 F_{1Real} \cos q_1 - a_2 \gamma F_2 \cos q_2 \\ & -a_3 F_{3Real} \cos q_3 - a_4 \gamma F_4 \cos q_4 \\ & + b_1 F_{1Real} \sin q_1 + b_2 \gamma F_2 \sin q_2 \\ & + b_3 F_{3Real} \sin q_3 + b_4 \gamma F_4 \sin q_4 = M_z \end{aligned} \quad (72)$$

$$F_{1Real} \cos q_1 + \gamma F_2 \cos q_2 + F_{3Real} \cos q_3 + \gamma F_4 \cos q_4 = F \quad (73)$$

## 【0151】

と記述される。したがって、この問題は、(71) - (73) を満足し、 $\gamma$  を最小化する  $q_i$  を求めることとなる。これは、非線形の最適化手法を利用してもよいが、次のような漸化式を利用する方法も考えられる。

## 【0152】

## 【数50】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \text{diag} \left[ \frac{1}{\sqrt{F_{1\text{Real}}}}, \frac{1}{\sqrt{\gamma_0 F_2}}, \frac{1}{\sqrt{F_{3\text{Real}}}}, \frac{1}{\sqrt{\gamma_0 F_4}} \right] \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{F_{1\text{Real}}} \cos q_{10} & \sqrt{\gamma_0 F_2} \cos q_{20} \\ \sqrt{F_{1\text{Real}}} (a_1 \sin q_{10} + b_1 \cos q_{10}) & \sqrt{\gamma_0 F_2} (a_2 \sin q_{20} + b_2 \cos q_{20}) \\ \sqrt{F_{3\text{Real}}} \cos q_{30} & \sqrt{\gamma_0 F_4} \cos q_{40} \\ \sqrt{F_{3\text{Real}}} (a_3 \sin q_{30} + b_3 \cos q_{30}) & \sqrt{\gamma_0 F_4} (a_4 \sin q_{40} + b_4 \cos q_{40}) \end{bmatrix}^+ \cdot \begin{bmatrix} d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} \quad (74)$$

## 【0153】

ただし、

## 【0154】

## 【数51】

$$\begin{aligned} d_3 &= \sum_{i=1,3} F_{i\text{Real}} (q_{i0} \cos q_{i0} - \sin q_{i0}) + \sum_{i=2,4} \gamma_0 F_i (q_{i0} \cos q_{i0} - \sin q_{i0}) \\ d_4 &= M_z + \sum_{i=1,3} F_{i\text{Real}} \{ (a_i + b_i q_{i0}) \cos q_{i0} + (a_i q_{i0} - b_i) \sin q_{i0} \} \\ &\quad + \sum_{i=2,4} \gamma_0 F_i \{ (a_i + b_i q_{i0}) \cos q_{i0} + (a_i q_{i0} - b_i) \sin q_{i0} \} \end{aligned}$$

## 【0155】

及び、

## 【0156】

【数 5 2】

$$\gamma = \frac{F - \sum_{i=1,3} F_{i \text{ Real}} \cos q_i}{\sum_{i=2,4} F_i \cos q_i} \quad (75)$$

【0 1 5 7】

である。

【0 1 5 8】

ここで、 $\gamma_0$ 、 $F_{i0}$ における添え字 0 は、前ステップの演算値を示している。  
 このようにして導出された  $q_i$  に基づき、高  $\mu$  側の車輪に関しては、(45) –  
 (52) 式に基づいて制駆動力と操舵角が導出できると共に、低  $\mu$  側の車輪に関  
 しては、高  $\mu$  側の車輪のスリップが、

【0 1 5 9】

【数 5 3】

$$k_i = \frac{3 F_i}{K_s} \left( 1 - (1 - \gamma)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (76)$$

【0 1 6 0】

であることを考慮して、(65) – (68) 式に基づき制駆動力と操舵角が導出  
 できる。

【0 1 6 1】

以上説明したように、本実施の形態の各輪の発生力の方向を操作量とする車両  
 運動制御則を導出した場合には、各輪のスリップ角、スリップ率を操作量とする  
 従来の方法と比較して、最適演算にタイヤ非線形モデルを含める必要がない、演  
 算する操作量の数が少ないこと等から従来の方法に比較して制御則の演算量は少  
 なくなり、4 輪独立操舵という高自由度のシステムへも展開が可能である。

【0 1 6 2】

4 輪独立操舵車両では、各輪の  $\mu$  利用率を均一にすると共に、 $\mu$  利用率を最小  
 化する制御則を導出する例について説明した。これは、所望の F & M (フォース  
 ・アンド・モーメント) を得る各輪制御の組み合わせの中で各輪の摩擦余裕を最

大化することを意味しており、安全性、耐故障性の向上が期待できる。

#### 【0163】

また、左右同角の前後輪操舵車両では、各輪の $\mu$ 利用率を同じ値にする制御則と各輪のタイヤ発生力を荷重配分に比例させる制御則を導出する例について説明した。両者は、均一 $\mu$ 路面走行時には、一致するものであり、また前述の4輪独立操舵制御則の解ともほぼ一致するものである。したがって、これらの制御則は均一 $\mu$ 路面走行時に、所望のF & Mを得る各輪制御の組み合わせの中で各輪の摩擦余裕を最大化する制御則となっていることを意味しており、安全性、耐故障性の向上が期待できる。

#### 【0164】

さらに、左右同角の前後輪操舵車両でタイヤ発生力を荷重配分に比例させる制御則において低 $\mu$ 側の車輪が摩擦限界に達した場合には、4輪独立操舵車両の制御則に基づいて導出された各輪の発生力の方向を前後輪操舵車両で実現するようにした。

#### 【0165】

次に、上記の原理を利用した本実施の形態の第2の具体的構成を図14に基づいて説明する。

#### 【0166】

本実施の形態は、電動パワーステアリング装置を搭載した車両に本発明を適用したものである。図に示すように、本実施の形態は、電動パワーステアリング装置のステアリングシャフトの回転角から操舵角を検出する操舵角センサ、電動パワーステアリング装置に流れる電流からパワーアシストトルクを検出するアシストトルクセンサ、操舵トルクを検出するトルクセンサ、車速を検出する車速センサ、アクセル開度を検出するアクセル開度センサ、ブレーキ踏力を検出するブレーキ踏力センサ、及び車輪速を検出する車輪速センサ等を含み、かつ車両に搭載されたセンサ群10、マイクロコンピュータで構成された制御装置12、及び制御装置12に接続された操舵角及び制駆動を協調して制御する協調制駆動装置14から構成されている。

#### 【0167】

マイクロコンピュータで構成された制御装置 12 は、予め記憶されたプログラムに従って複数の機能を有するように制御されるが、この制御装置 12 を機能ブロックで表すと、SAT（セルフアライニングトルク）を推定する SAT 推定手段 16、目標合成力を演算する目標合成力演算手段 18、各車輪の限界摩擦円の大きさ（半径）を各々推定する限界摩擦円推定手段 20、限界合成力の大きさを推定する限界合成力推定手段 22、 $\mu$  利用率設定手段 24、タイヤ発生力の大きさを設定するタイヤ発生力大きさ設定手段 26、各車輪のタイヤ発生力の方向を設定する各輪発生力設定手段 28、及び協調制駆動装置 14 に接続された制御手段 30 で構成される。

#### 【0168】

SAT 推定手段 16 は、トルクセンサで検出された操舵トルク及びアシストトルクセンサで検出されたアシストトルクに基づいて、SAT を推定する。

#### 【0169】

目標合成力演算手段 18 は、各センサで検出された操舵角、車速、アクセル開度、及びブレーキ踏力等からドライバの望む車体運動を得るために車体に加えるべき目標合成力、及びヨーモーメント  $M_z$  を演算する。

#### 【0170】

これらの目標合成力、及びヨーモーメント  $M_z$  としては、例えば、ドライバの操作に応じて設定される目標となる車両運動状態量であるヨー角速度と、車体スリップ角の実測値または推定値との偏差に応じて、この偏差を 0 に漸近させるために必要な合成力及びヨーモーメントを用いることができる。

#### 【0171】

限界摩擦円推定手段 20 は、各車輪毎の限界摩擦円の大きさを、SAT 推定手段 16 で推定された SAT、及び車輪速センサで検出された車輪速に基づいて推定する。

#### 【0172】

限界合成力推定手段 22 は、限界摩擦円推定手段 20 で推定された各論の限界摩擦円の大きさから限界合成力の大きさを推定する。この推定は、単純に各輪の限界摩擦力の総和を限界合成力としたり、各輪の限界摩擦力の総和に定数を乗じ

た値を限界合成力とすることもできるし、目標合成力の方向を  $\theta$  として  $\theta$  と目標ヨーモーメントから上記の (20) 式～(24) 式に基づいて角度  $q_i$  を求め、さらに上記 (11) 式に基づいて限界合成力  $J$  を演算しても良い。

### 【0173】

$\mu$  利用率設定手段 24 は、目標合成力と限界合成力との大きさの比を  $\mu$  利用率  $\gamma$  として設定する。ただし、目標合成力が限界合成力を超えた場合には、 $\mu$  利用率は 1 に設定する。

### 【0174】

タイヤ発生力大きさ設定手段 26 は、限界摩擦円に  $\mu$  利用率を乗じて各車輪で利用するタイヤ発生力の大きさを設定する。

### 【0175】

各輪発生力方向設定手段 28 は、目標合成力の方向  $\theta$  と利用する各輪のタイヤ発生力の大きさ  $\gamma F_i$  とから (20) 式～(24) 式の  $F_i$  を  $\gamma F_i$  に置き換えて得られる次式に基づいて角度  $q_i$  を求め、各輪のタイヤ発生力の大きさ  $\gamma F_i$  及び方向 ( $q_i + \theta$ ) を出力する。

### 【0176】

#### 【数 54】

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} &= \text{diag} \left[ \frac{1}{\sqrt{F_1}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_2}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_3}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_4}} \right] \\
 &\quad \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{F_1} & \sqrt{F_2} & \sqrt{F_3} & \sqrt{F_4} \\ b_1 \sqrt{F_1} & b_2 \sqrt{F_2} & b_3 \sqrt{F_3} & b_4 \sqrt{F_4} \end{bmatrix}^+ \\
 &\quad \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_z}{\gamma} + (a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4) \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\frac{M_z}{\gamma} + (a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4)}{b_1 c_1 F_1 + b_2 c_2 F_2 + b_3 c_3 F_3 + b_4 c_4 F_4} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (77)
 \end{aligned}$$

【0177】

ただし、

【0178】

【数55】

$$c_1 = (b_1 - b_2) F_2 + (b_1 - b_3) F_3 + (b_1 - b_4) F_4 \quad (78)$$

$$c_2 = (b_2 - b_1) F_1 + (b_2 - b_3) F_3 + (b_2 - b_4) F_4 \quad (79)$$

$$c_3 = (b_3 - b_1) F_1 + (b_3 - b_2) F_2 + (b_3 - b_4) F_4 \quad (80)$$

$$c_4 = (b_4 - b_1) F_1 + (b_4 - b_2) F_2 + (b_4 - b_3) F_3 \quad (81)$$

【0179】

制御手段30は、各輪の発生力の大きさ $\gamma F_i$ 及び方向 $q_i + \theta$ に基づいて、各車輪の操舵角と制動力、または操舵各とは駆動力とを求め、操舵装置と制動用アクチュエータまたは操舵装置と駆動用アクチュエータとを制御する。各車輪の制駆動力は、各車輪のタイヤ発生力の大きさ $\gamma F_i$ 及び方向 $q_i + \theta$ から

【0180】

【数56】

$$F_{x_i} = \gamma F_i \cos(q_i + \theta) \quad (82)$$

【0181】

と導出できる。また、同様に各輪の横力は、

【0182】

【数57】

$$F_{y_i} = \gamma F_i \sin(q_i + \theta) \quad (83)$$

【0183】

と導出できる。

【0184】

各車輪の操舵角は、例えば、ブラッシュモデルと車両運動モデルとに基づいて演算することができる。ブラッシュモデルは、タイヤ発生力特性を理論式に基づ

いて記述したモデルである。タイヤ発生力がブラッシュモデルに従って発生すると仮定すると、限界摩擦力  $F_i$ 、 $\mu$  利用率  $\gamma$ 、発生力の方向  $q_i + \theta$  からスリップ角  $\beta_i$  を以下の式で演算することができる。

【0185】

【数58】

$$\beta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_i \sin(q_i + \theta)}{1 - k_i \cos(q_i + \theta)} \right] \quad (84)$$

【0186】

ただし、

【0187】

【数59】

$$k_i = \frac{3 F_i}{K_s} \left[ 1 - (1 - \gamma)^{1/3} \right] \quad (85)$$

【0188】

ここで、 $K_s$  はドライビングステイフネス、 $K_\beta$  はコーナリングステイフネスである。さらに、各輪の舵角は、スリップ角  $\beta_i$  から車両運動モデルに基づいて演算される。すなわち、車速  $v$ 、操舵角、アクセル開度、ブレーキ踏力等から目標となる車両運動状態量として演算されるヨー角速度  $r_0$ 、車体スリップ角  $\beta_0$  から下記のように演算することができる。

【0189】

【数60】

$$\delta_1 = \beta_0 + \frac{L_f}{v} r_0 - \beta_1 \quad (86)$$

$$\delta_2 = \beta_0 + \frac{L_f}{v} r_0 - \beta_2 \quad (87)$$

$$\delta_3 = \beta_0 - \frac{L_r}{v} r_0 - \beta_3 \quad (88)$$

$$\delta_4 = \beta_0 - \frac{L_r}{v} r_0 - \beta_4 \quad (89)$$



## 【0190】

この制御に基づく操舵制御と制駆動制御の協調制御を実施した場合、常に各車輪の $\mu$ 利用率を均等にすることが可能になり、路面や横風等の外乱に対し最も余裕のある運動性能を示すことが可能である。

## 【0191】

また、本実施の形態は、前後輪の $\mu$ 利用率を独立に設定することもできる。 $\mu$ 利用率を独立に設定する場合には、前後輪の $\mu$ 利用率を各々 $\gamma_f$ 、 $\gamma_r$ とすると、下記のように表すことができる。

## 【0192】

## 【数61】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \frac{M_z + a_1 \gamma_f F_1 + a_2 \gamma_f F_2 + a_3 \gamma_r F_3 + a_4 \gamma_r F_4}{b_1 c_1 \gamma_f F_1 + b_2 c_2 \gamma_f F_2 + b_3 c_3 \gamma_r F_3 + b_4 c_4 \gamma_r F_4} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (100)$$

## 【0193】

ただし、

## 【0194】

## 【数62】

$$c_1 = (b_1 - b_2) \gamma_f F_2 + (b_1 - b_3) \gamma_r F_3 + (b_1 - b_4) \gamma_r F_4 \quad (101)$$

$$c_2 = (b_2 - b_1) \gamma_f F_1 + (b_2 - b_3) \gamma_r F_3 + (b_2 - b_4) \gamma_r F_4 \quad (102)$$

$$c_3 = (b_3 - b_1) \gamma_f F_1 + (b_3 - b_2) \gamma_f F_2 + (b_3 - b_4) \gamma_r F_4 \quad (103)$$

$$c_4 = (b_4 - b_1) \gamma_f F_1 + (b_4 - b_2) \gamma_f F_2 + (b_4 - b_3) \gamma_r F_3 \quad (104)$$

## 【0195】

このように前後輪の $\mu$ 利用率を独立に設定することによって、すなわち前後輪の $\mu$ 利用率を異ならせることによって、例えば、後輪の $\mu$ 利用率を前輪の $\mu$ 利用率に比較して小さく設定することにより、後輪の摩擦余裕を高めることによってスピン抑制効果の高い安定性を重視した運動制御を実現することができる。

## 【0196】

また、(101)式～(104)式は、対象となる車輪の位置から他の車輪ま

での車体合成力方向距離と  $\mu$  利用率を勘案した出力すべきタイヤ発生力の大きさとの積の和を表しており、結局各車輪の力の方向の車体合成力方向に対する角度は、各々の車輪の位置から他の車輪までの車体合成力方向距離と出力すべきタイヤ発生力の大きさとの積の和に比例していることを表している。

#### 【0197】

さらに、 $a_i$ 、 $b_i$  が車体合成力方向  $\theta$  の関数であることを考えると、各車輪の力の方向の車体合成力方向に対する角度は、車体合成力方向と各車輪の出力すべきタイヤ発生力の大きさの関数として記述できることを表している。

#### 【0198】

次に左右同じ操舵角で制御する通常の4輪操舵車に本発明を適用した実施の形態について説明する。

#### 【0199】

左右輪の操舵角が一致している従来の4輪操舵の場合には、左右輪のスリップ角が一致するという下記(105)式及び(106)式の拘束条件が付加されることになる。これらの拘束条件は、整理すると下記(107)式及び(108)式の式のように表すことができる。

#### 【0200】

【数 6 3】

$$\begin{aligned} \tan^{-1} \left( \frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_1 \sin(q_1 + \theta)}{1 - k_1 \cos(q_1 + \theta)} \right) \\ = \tan^{-1} \left( \frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_2 \sin(q_2 + \theta)}{1 - k_2 \cos(q_2 + \theta)} \right) \end{aligned} \quad (105)$$

$$\begin{aligned} \tan^{-1} \left( \frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_3 \sin(q_3 + \theta)}{1 - k_3 \cos(q_3 + \theta)} \right) \\ = \tan^{-1} \left( \frac{K_s}{K_\beta} \cdot \frac{-k_4 \sin(q_4 + \theta)}{1 - k_4 \cos(q_4 + \theta)} \right) \end{aligned} \quad (106)$$

$$k_2 \sin(q_2 + \theta) - k_1 \sin(q_1 + \theta) - k_1 k_2 \sin(q_2 - q_1) = 0 \quad (107)$$

$$k_4 \sin(q_4 + \theta) - k_3 \sin(q_3 + \theta) - k_3 k_4 \sin(q_4 - q_3) = 0 \quad (108)$$

【0 2 0 1】

さらに、1 次近似すると下記のように表される。

【0 2 0 2】

【数 6 4】

$$\begin{aligned} -k_1(\cos \theta - k_2)q_1 + k_2(\cos \theta - k_1)q_2 \\ = (k_1 - k_2) \sin \theta \end{aligned} \quad (109)$$

$$\begin{aligned} -k_3(\cos \theta - k_4)q_3 + k_4(\cos \theta - k_3)q_4 \\ = (k_3 - k_4) \sin \theta \end{aligned} \quad (110)$$

【0 2 0 3】

また、これらを  $p_i$  で表現すると下記のようになり、

【0 2 0 4】

【数 6 5】

$$-\frac{k_1}{\sqrt{F_1}}(\cos \theta - k_2) p_1 + \frac{k_2}{\sqrt{F_2}}(\cos \theta - k_1) p_2 \\ = (k_1 - k_2) \sin \theta \quad (1 \ 1 \ 1)$$

$$-\frac{k_3}{\sqrt{F_3}}(\cos \theta - k_4) p_3 + \frac{k_4}{\sqrt{F_4}}(\cos \theta - k_3) p_4 \\ = (k_3 - k_4) \sin \theta \quad (1 \ 1 \ 2)$$

【0 2 0 5】

$\mu$  利用率  $\gamma$  で走行する場合の下記 (1 1 3) 式及び (1 1 4) 式で表される他の拘束条件を同時に考慮することによって、各車輪の発生合力方向と単輪発生力とのなす角  $q_i$  を下記 (1 1 5) 式に示すように一意に求めることが可能である。

【0 2 0 6】

## 【数 6 6】

$$\sqrt{F_1} p_1 + \sqrt{F_2} p_2 + \sqrt{F_3} p_3 + \sqrt{F_4} p_4 = 0 \quad (113)$$

$$\begin{aligned} b_1 \sqrt{F_1} p_1 + b_2 \sqrt{F_2} p_2 + b_3 \sqrt{F_3} p_3 + b_4 \sqrt{F_4} p_4 \\ = \frac{M_z}{\gamma} + (a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4) \end{aligned} \quad (114)$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \text{diag} \left[ \frac{1}{\sqrt{F_1}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_2}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_3}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_4}} \right] \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{F_1} & \sqrt{F_2} & \sqrt{F_3} & \sqrt{F_4} \\ b_1 \sqrt{F_1} & b_2 \sqrt{F_2} & b_3 \sqrt{F_3} & b_4 \sqrt{F_4} \\ -\frac{k_1}{\sqrt{F_1}}(\cos \theta - k_2) & \frac{k_2}{\sqrt{F_2}}(\cos \theta - k_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_3}{\sqrt{F_3}}(\cos \theta - k_4) & \frac{k_4}{\sqrt{F_4}}(\cos \theta - k_3) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_z}{\gamma} + a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 + a_4 F_4 \\ (k_1 - k_2) \sin \theta \\ (k_3 - k_4) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (115)$$

## 【0207】

また、このときの各車輪の摩擦力及び操舵角は、(82)式、(84)式～(89)式によって演算される。ただし、(87)式、(89)式において左右輪の操舵角は同じ値が演算される。なお、(115)式は1次近似によって算出されたものであり、この値を初期値として対応する非線形の方程式を数値的に求め、この解に基づく制御を行なうこともできる。この場合には、さらに正確に制御することができる。

## 【0208】

この制御に基づく操舵制御と制駆動制御との協調を実施した場合、常に各車輪の $\mu$ 利用率を均等にすることが可能になり、路面や横風等の外乱に対し最も余裕のある運動性能を示すことが可能である。

## 【0209】

また、左右輪の操舵角を一致させる場合においても各車輪の $\mu$ 利用率を独立に設定することも可能である。この場合の各車輪の発生合力方向と単輪発生力との成す角 $q_i$ は下記の式で表される。

## 【0210】

【数67】

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} &= \text{diag} \left[ \frac{1}{\sqrt{F_1 \gamma_f}}, \frac{1}{\sqrt{F_2 \gamma_f}}, \frac{1}{\sqrt{F_3 \gamma_r}}, \frac{1}{\sqrt{F_4 \gamma_r}} \right] \cdot \\
 &\cdot \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{F_1 \gamma_f}}{b_1 \sqrt{F_1 \gamma_f}} & \frac{\sqrt{F_2 \gamma_f}}{b_2 \sqrt{F_2 \gamma_f}} & \frac{\sqrt{F_3 \gamma_r}}{b_3 \sqrt{F_3 \gamma_r}} & \frac{\sqrt{F_4 \gamma_r}}{b_4 \sqrt{F_4 \gamma_r}} \\ -\frac{k_1}{\sqrt{F_1 \gamma_f}}(\cos\theta - k_2) & \frac{k_2}{\sqrt{F_2 \gamma_f}}(\cos\theta - k_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_3}{\sqrt{F_3 \gamma_r}}(\cos\theta - k_4) & \frac{k_4}{\sqrt{F_4 \gamma_r}}(\cos\theta - k_3) \end{bmatrix}^{-1} \\
 &\cdot \begin{bmatrix} 0 \\ M_z + (a_1 F_1 \gamma_f + a_2 F_2 \gamma_f + a_3 F_3 \gamma_r + a_4 F_4 \gamma_r) \\ (k_1 - k_2) \sin\theta \\ (k_3 - k_4) \sin\theta \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} F_1 \gamma_f & F_2 \gamma_f & F_3 \gamma_r & F_4 \gamma_r \\ b_1 F_1 \gamma_f & b_2 F_2 \gamma_f & b_3 F_3 \gamma_r & b_4 F_4 \gamma_r \\ -k_1(\cos\theta - k_2) & k_2(\cos\theta - k_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3(\cos\theta - k_4) & k_4(\cos\theta - k_3) \end{bmatrix}^{-1} \\
 &\cdot \begin{bmatrix} 0 \\ M_z + (a_1 F_1 \gamma_f + a_2 F_2 \gamma_f + a_3 F_3 \gamma_r + a_4 F_4 \gamma_r) \\ (k_1 - k_2) \sin\theta \\ (k_3 - k_4) \sin\theta \end{bmatrix} \quad (116)
 \end{aligned}$$

## 【0211】

さらに、本実施の形態は、前輪及び後輪のいずれかのみが左右独立に操舵可能となる車両に対しても適用可能であり、例えば、後輪のみが左右独立に操舵できる車両の場合には、各車輪の発生合力方向と単輪発生力との成す角 $q_i$ は、下記の式で記述することができる。

## 【0212】

【数 6 8】

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \text{diag} \left[ \frac{1}{\sqrt{F_1 \gamma_f}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_2 \gamma_f}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_3 \gamma_f}} \quad \frac{1}{\sqrt{F_4 \gamma_f}} \right] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{F_1 \gamma_f} & \sqrt{F_2 \gamma_f} & \sqrt{F_3 \gamma_f} & \sqrt{F_4 \gamma_f} \\ b_1 \sqrt{F_1 \gamma_f} & b_2 \sqrt{F_2 \gamma_f} & b_3 \sqrt{F_3 \gamma_f} & b_4 \sqrt{F_4 \gamma_f} \\ -\frac{k_1}{\sqrt{F_1 \gamma_f}} (\cos \theta - k_2) & \frac{k_2}{\sqrt{F_2 \gamma_f}} (\cos \theta - k_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^+$$

$$\cdot \begin{bmatrix} M_z + (a_1 F_1 \gamma_f + a_2 F_2 \gamma_f + a_3 F_3 \gamma_f + a_4 F_4 \gamma_f) \\ (k_1 - k_2) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (117)$$

【0 2 1 3】

なお、本実施の形態のタイヤ発生力の大きさは、摩擦円の大きさを表すこともできる。

【0 2 1 4】

【発明の効果】

以上説明したように本発明によれば、操舵と制動または操舵と駆動との協調制御を効率的に行なうことができる、という効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 車両運動モデルを示す概略図である。

【図 2】 図 1 の車両運動モデルにおける発生合力に対応した座標系を示す概略図である。

【図 3】 限界摩擦円を示す線図である。

【図 4】 本発明の実施の形態の第 1 の具体的構成を示すブロック図である。

【図 5】 第 1 の具体的構成によって、またぎ路面で直進制動を行ったときの制動加速度を比較して示すシミュレーション結果の図である。

【図 6】 (1) は前後輪操舵の場合における演算された各輪の発生力方向と演算繰り返し回数とを示す線図、(2) は 4 輪独立操舵の場合における演算された各輪の発生力方向と演算繰り返し回数とを示す線図ある。

【図 7】収束後の各輪の発生力ベクトルと操舵角とを示す線図である。

【図 8】タイヤ発生力特性を示す線図である。

【図 9】湿潤路、乾燥路のまたぎ路面における旋回制動時の限界加速度を比較して示すシミュレーション結果の図である。

【図 10】(1) は前後輪操舵の場合における演算された各輪の発生力方向と演算繰り返し回数とを示す線図、(2) は 4 輪独立操舵の場合における演算された各輪の発生力方向と演算繰り返し回数とを示す線図ある。

【図 11】収束後の各輪の発生力ベクトルと操舵角とを示す線図である。

【図 12】タイヤ発生力を理論的に記述したブラッシュモデルに基づいて導出されたタイヤ特性と実際のタイヤ特性とを比較して示す線図である。

【図 13】均一 $\mu$ 路の旋回制動における収束後の各輪の発生力ベクトルと操舵角とを示す線図である。

【図 14】本発明の実施の形態の第 2 の具体例を示すブロック図である。

【符号の説明】

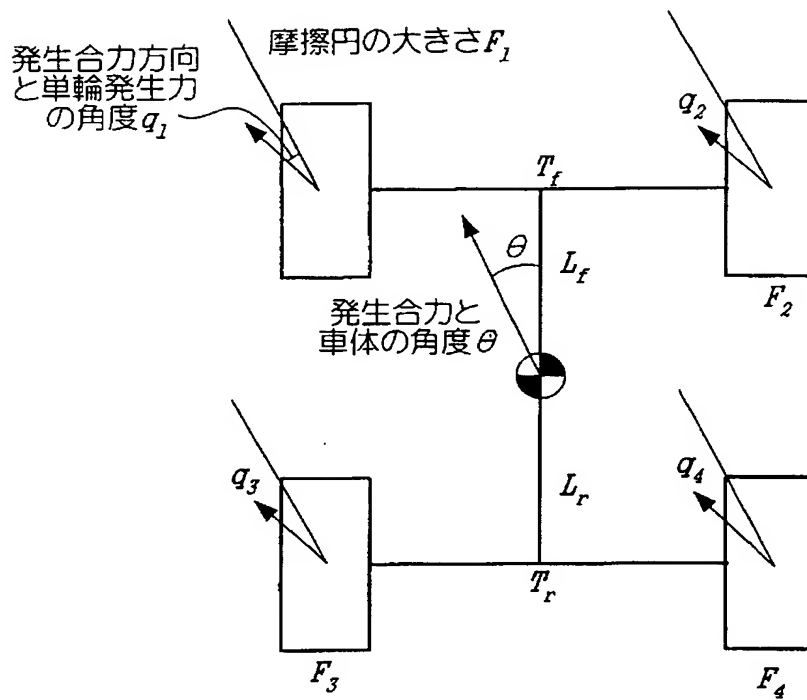
10 センサ群

12 制御装置



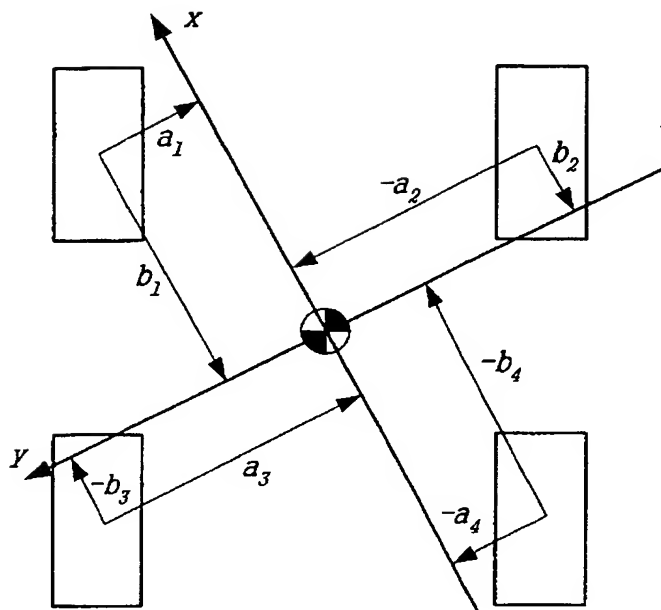
【書類名】 図面

【図 1】



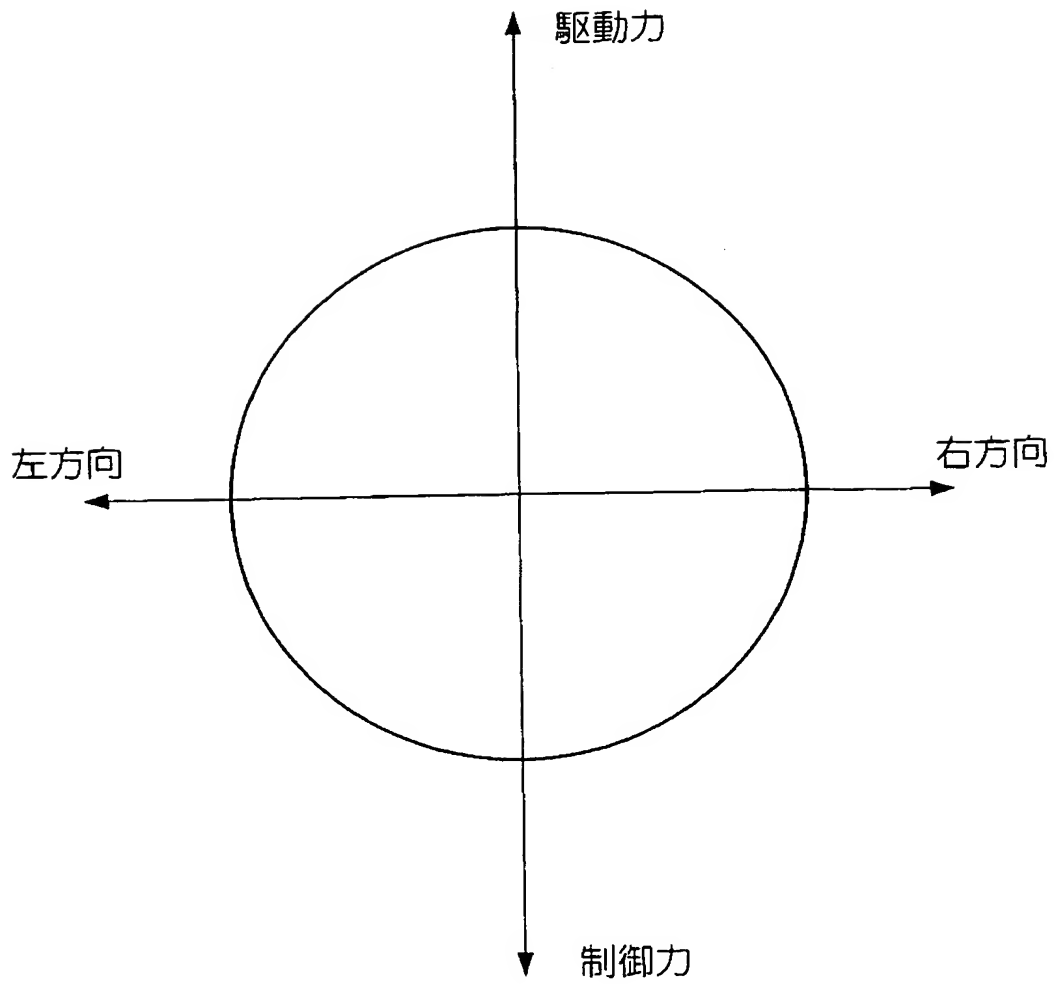
車両モデル

【図 2】

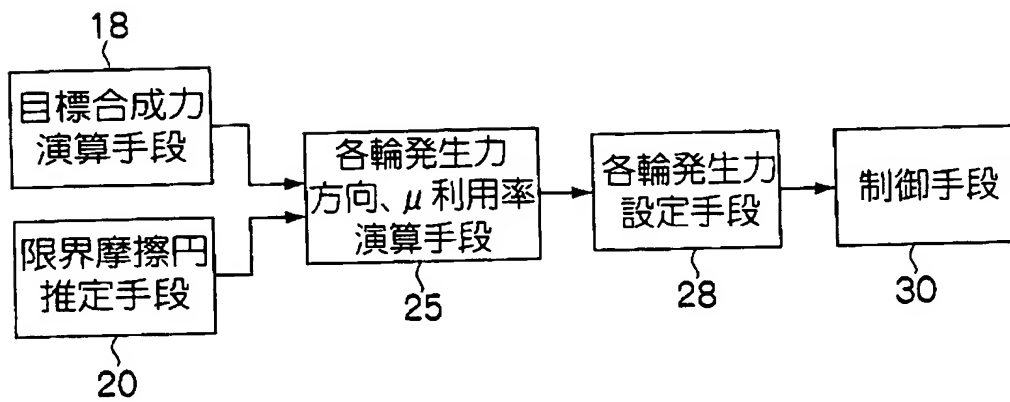


発生合力に対応した座標系

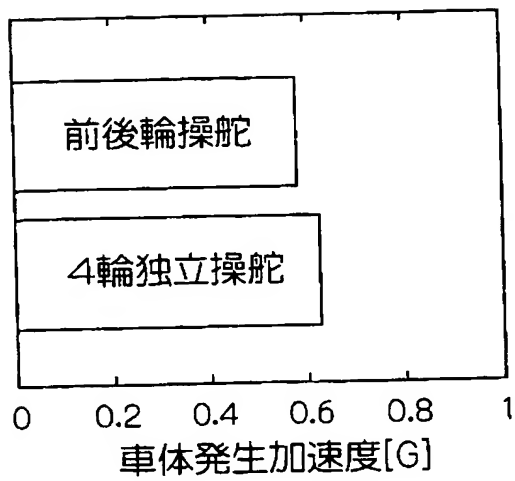
【図 3】



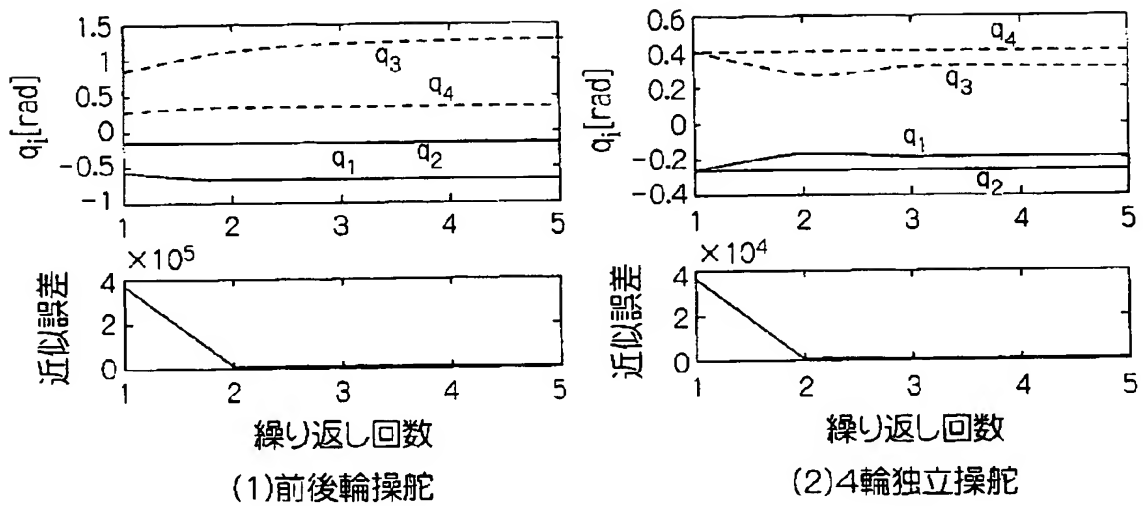
【図 4】



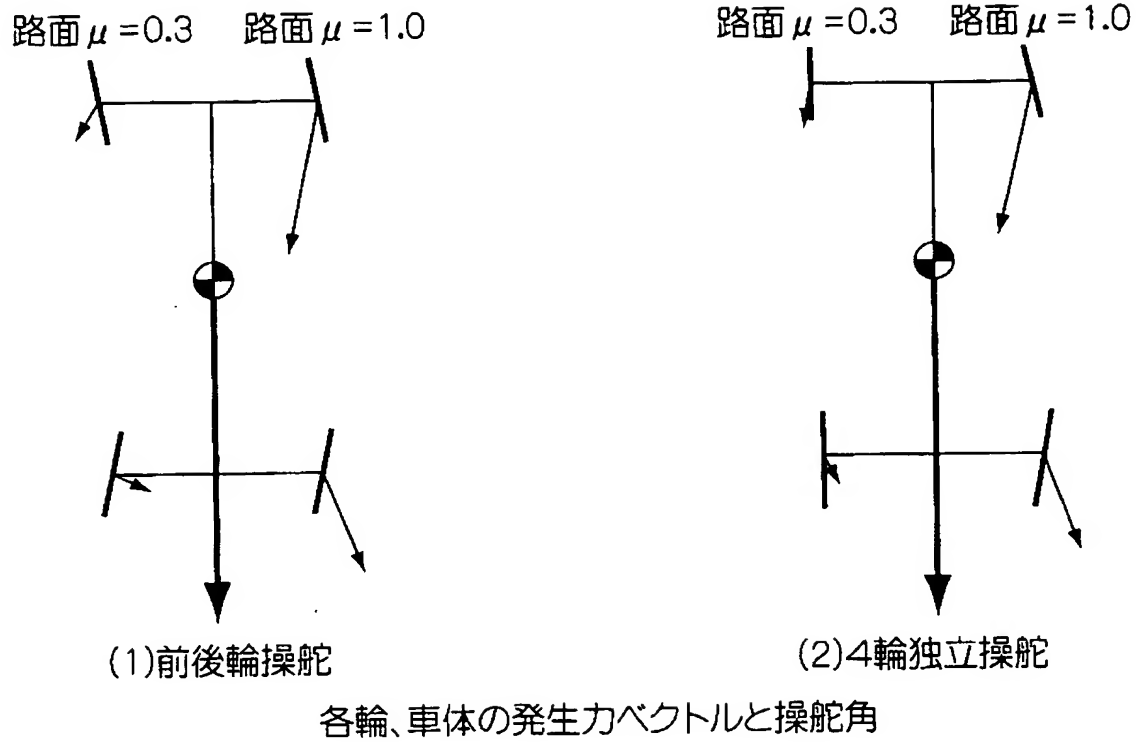
【図 5】



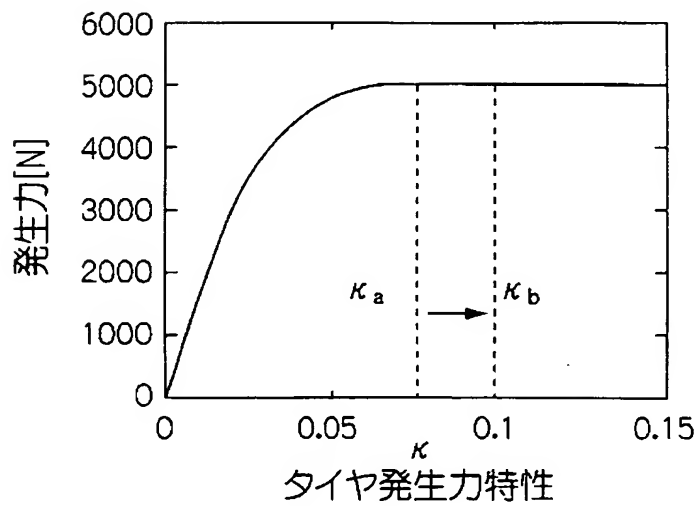
【図 6】



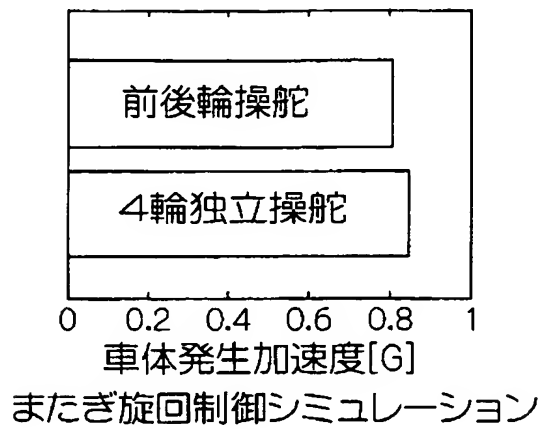
【図 7】



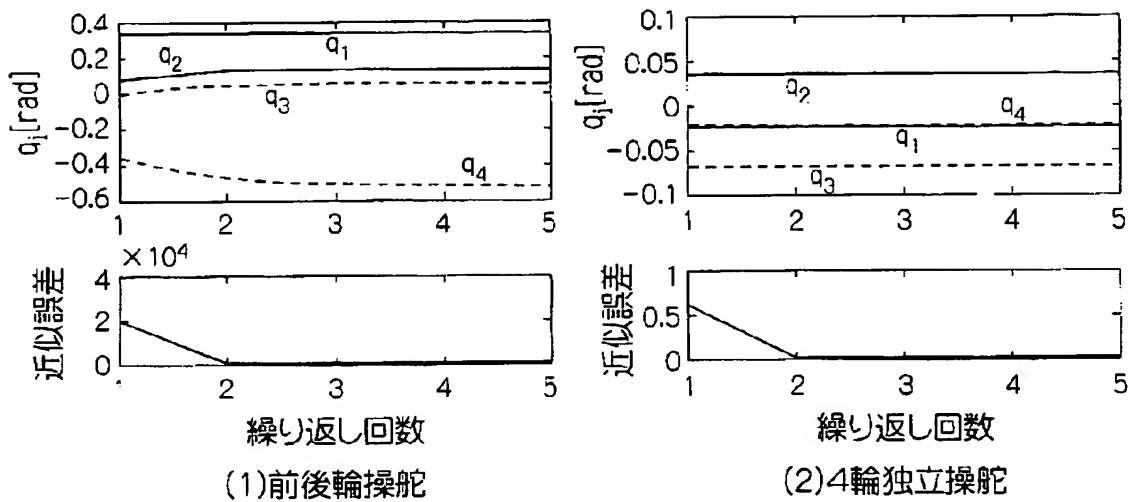
【図 8】



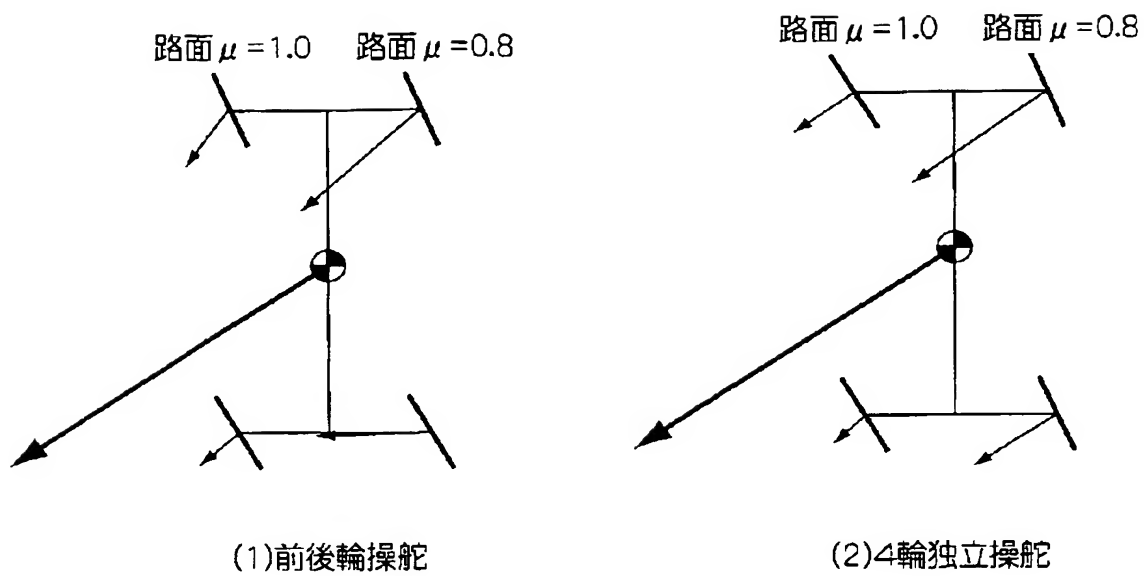
【図 9】



【図 10】

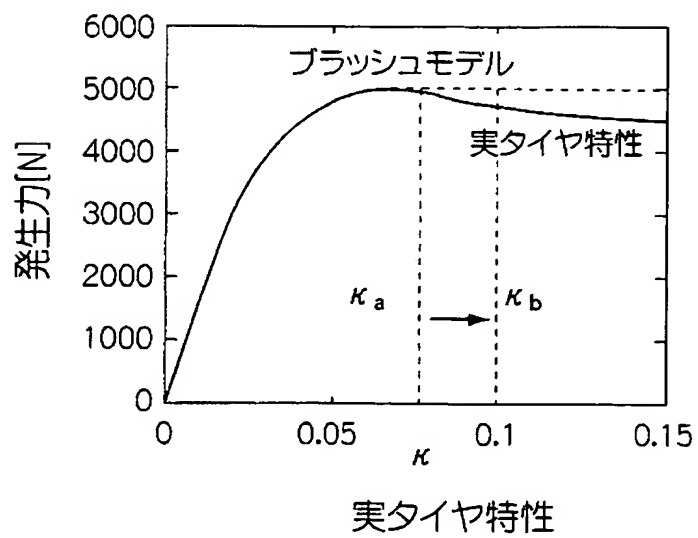


【図 1 1】

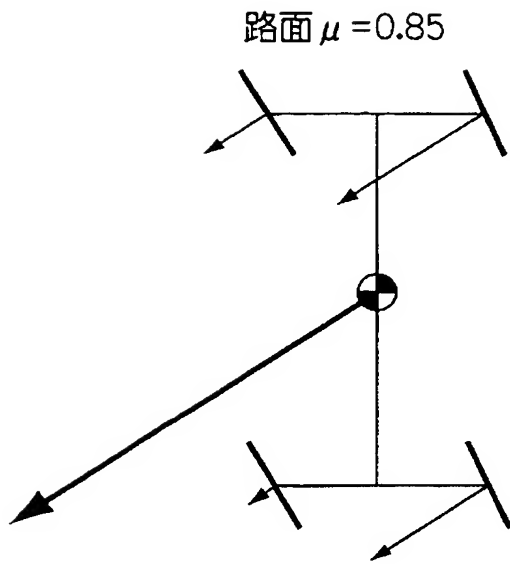


各輪、車体の発生力ベクトルと操舵角

【図 1 2】

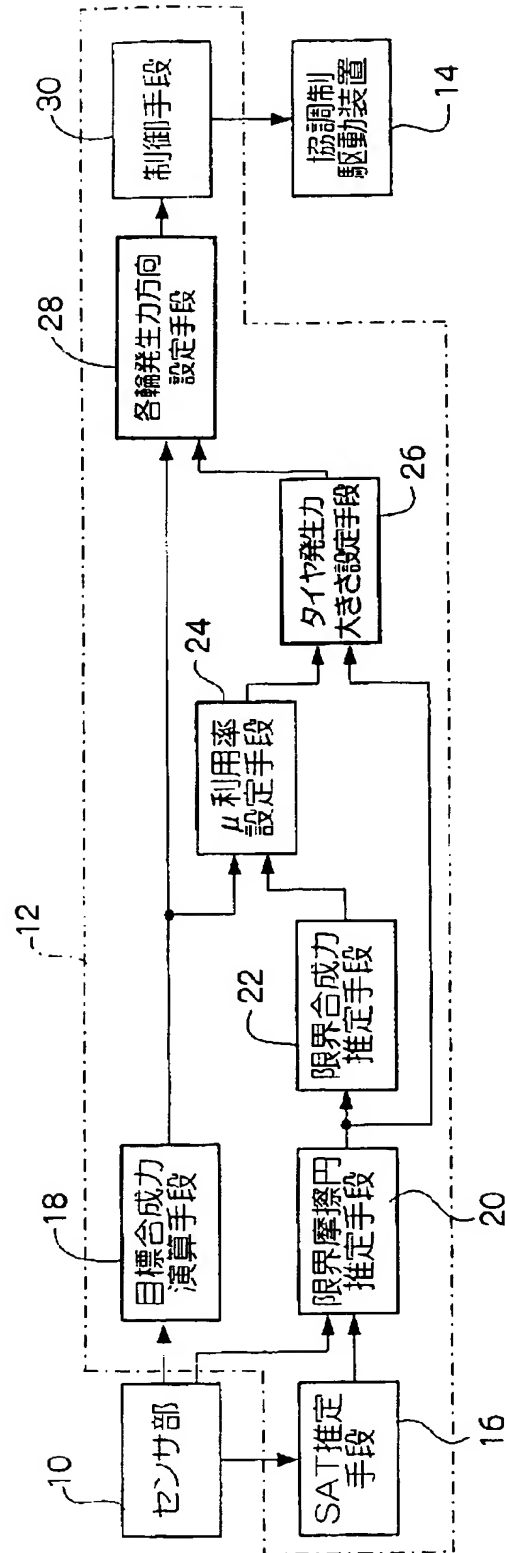


【図 13】



均一  $\mu$  路における旋回制御

【図 14】





【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 操舵と制動または操舵と駆動との協調制御を行なう。

【解決手段】 車体に加える目標合成力を演算し（18）、各車輪の限界摩擦円の大きさを推定し（20）、推定された限界摩擦円の大きさから限界合成力を推定し（22）、目標合成力と限界合成力との比を $\mu$ 利用率として設定し（24）、限界摩擦円の大きさと $\mu$ 利用率とからタイヤ発生力の大きさを設定する（26）。各制御対象車輪で発生するタイヤ発生力の方向を、方向を求める制御対象車輪の位置から他の車輪までの発生合力の方向の距離と他の車輪のタイヤ発生力の大きさとの積を他の車輪の全てについて加算した和に基づいて各々設定し（28）、設定されタイヤ発生力の大きさ、及び設定されたタイヤ発生力の方向に基づいて、各制御対象車輪の操舵と制動または操舵と駆動との協調制御を行なう（30）。

【選択図】 図 1 4

特願 2 0 0 3 - 0 2 4 1 7 7

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[ 0 0 0 0 0 3 6 0 9 ]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 9 月 6 日

[変更理由]

新規登録

住 所

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道 4 1 番地の 1

氏 名

株式会社豊田中央研究所